

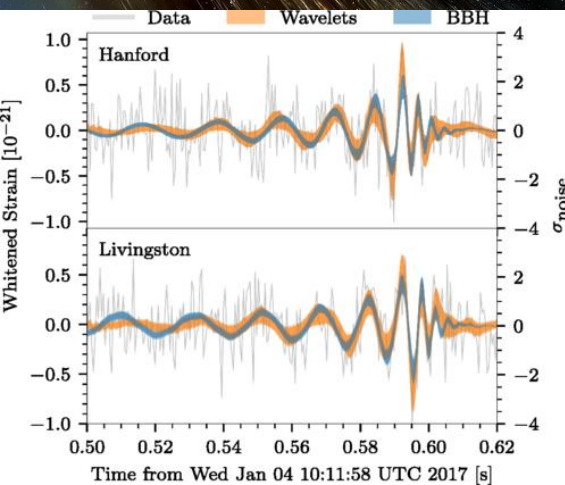
# Vers une Astronomie de la gravitation

Stage DAFOP 17A0100217 12 décembre 2018

François Sibille

Association SÉLÉNÉ

Académie des Sciences Belles Lettres et Arts de Lyon



# Remarques préliminaires sur la gravitation

Action universelle : classique (Newton) → relie toutes les masses entre elles  
relativiste (Einstein) → relie l'espace et la masse  
et la masse à toutes les formes d'énergie

Principe d'équivalence entre masse inertielle et masse grave.

Rien ne l'arrête : toujours attractive, pas de masse négative ( sauf cas particuliers \*)  
pas de blindage possible

L'Univers est électriquement neutre, et si une « charge électrique » apparaît quelque part (zone de charge d'espace, par ex.), son action est immédiatement neutralisée par celle d'une autre charge.

Portée :  $1/r^2$  . Pas d'échelle de portée (comme les interactions faibles et fortes)

C'est la plus faible des 4 interactions. Exemple pour deux protons : rapport entre force de gravité et force électrique :

$$f_{grav} = G \frac{m_p^2}{r^2} \quad f_{elec} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \frac{f_{grav}}{f_{elec}} \approx 10^{-36}$$

\* La gravitation a été répulsive pendant la phase inflationnaire de l'Univers

## Comment se « propage » le champ de gravité ?

Si 2 masses bougent l'une par rapport à l'autre, quelque part dans l'Univers :  
l'apprendrons nous ? Et quand ?

Propagation instantanée ? Idée choquante pour Poincaré.

Pour Einstein, ne cadre pas avec la relativité générale.

photon : (particule « porteuse » de la force elm)

Porte de l'énergie, mais pas de charge → ne perturbe pas le champ elm qu'il porte.

graviton : (particule « porteuse » de la force de gravité)

Porte de l'énergie, donc de la masse, qui produit de la gravité, donc qui perturbe le champ qu'il porte.

Equation d'Einstein : 
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$
 Très compliqué en général

termes d'espace ↔ termes d'énergie-masse

Plus simple dans des cas particuliers, par ex. : loin de la source → approximation « champ faible » (\*)(\*\*)

**Alors**, l'équation d'Einstein a une solution qui prévoit l'existence **d'ondes gravitationnelles (OG)**,

- Produites par des masses accélérées (très grandes masses, très accélérées)
- Hors de la symétrie sphérique : distribution de masse « quadripolaire »

(\*déc. 2018 : vérification de la relativité générale « en champs fort » par la perturbation de l'orbite d'une étoile au voisinage du trou noir au centre de la Galaxie )

(\*\* Développements limités au 1<sup>er</sup> ordre)

## C'est quoi une OG ?

-C'est un phénomène qui déforme l'espace sur son passage. En effet :  
l'espace peut être dilaté ou comprimé.

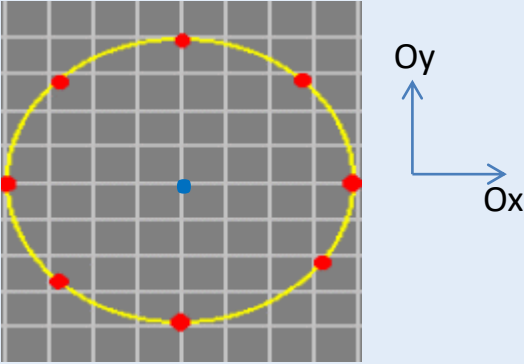
- Pour voir si l'espace a été dilaté/comprimé au passage d'une OG, on « marque » l'espace avec des « masses de test » (forcément au moins 2 !). Ces masses doivent être petites pour ne pas perturber le champ de gravité environnant.
- L'onde se propage en ligne droite à la vitesse de la lumière (Relat. Gén.).
- L'onde est « transverse » : ses effets se produisent dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation.
- L'onde interagit très peu avec la matière --> perd peu d'énergie en la traversant L'Univers est très transparent aux OG.
- Si au passage d'une onde la distance  $L$  entre deux masses de test varie de  $\delta L(t)$ , le rapport  $h(t) = \delta L(t)/L$  (strain, sans dimension) caractérise l'amplitude de l'effet.
- On s'attend à des effets TRES PETIT. L'ordre de grandeur typique de  $h(t)$  est  $10^{-21}$ .

# A quoi ressemble l'effet d'une OG ?

Oz = axe de propagation d'une OG.

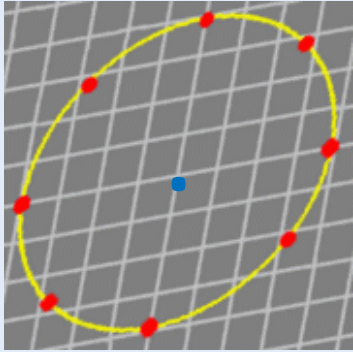
On dispose 8 masses de test sur un cercle de diamètre L (points rouges)

L'onde comporte deux directions de polarisation



Polarisation « + », « plus », ou (x,y)

$$h_+(t) \left\{ \begin{array}{l} \Delta x / x = \frac{h_+}{2} \sin(\omega t) \\ \Delta y / y = -\frac{h_+}{2} \sin(\omega t) \end{array} \right\}$$

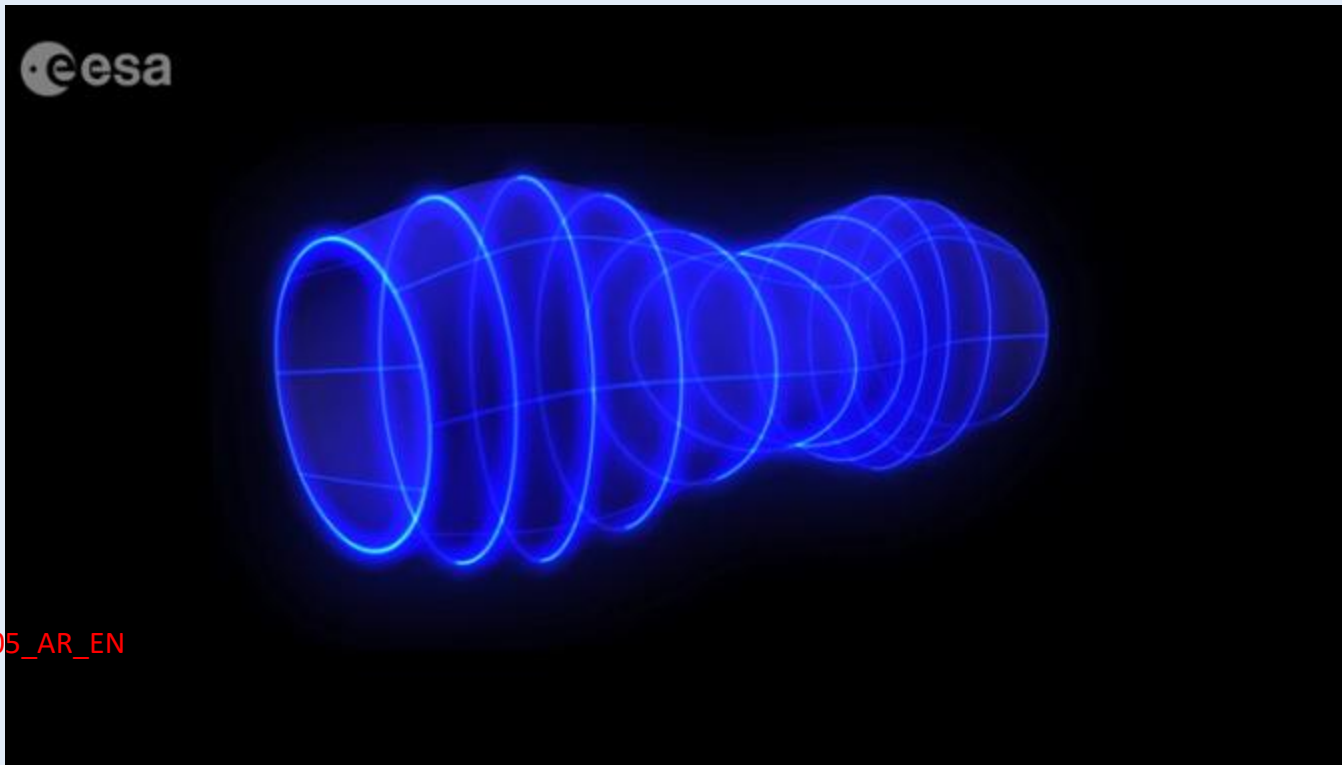


2eme Polarisation « x », « croix »

$$h_x(t) \left\{ \begin{array}{l} \Delta x / y = \frac{h_x}{2} \sin(\omega t) \\ \Delta y / x = \frac{h_x}{2} \sin(\omega t) \end{array} \right\}$$

(Animation : Wm. Robert Johnston.)

[https://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2015/09/Gravitational\\_waves](https://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2015/09/Gravitational_waves)



1509\_005\_AR\_EN

# Un peu d'histoire

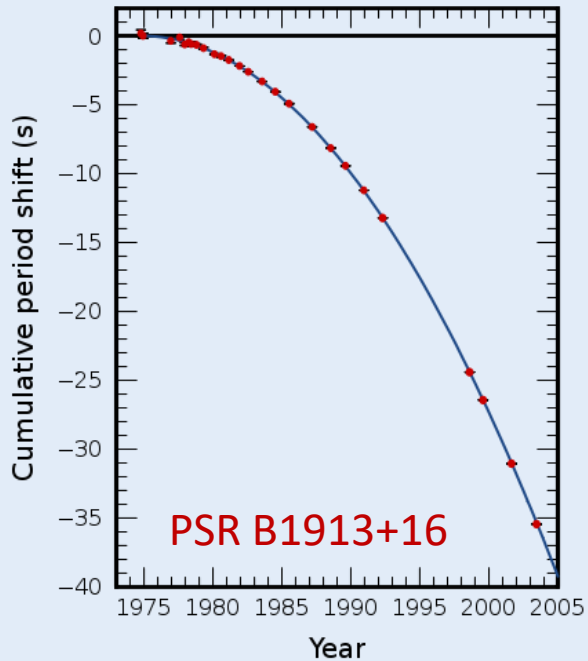
Existence prédite par Einstein et plusieurs autres dès le début du XX<sup>e</sup> S.

# Les OG avant LIGO

1° recherche de détection des OG :  
Les « barres de Weber »

L'OG fait résonner le bloc de métal  
très longtemps (diapason)

Durée → Précision de mesure  
1950 → 1987 échec

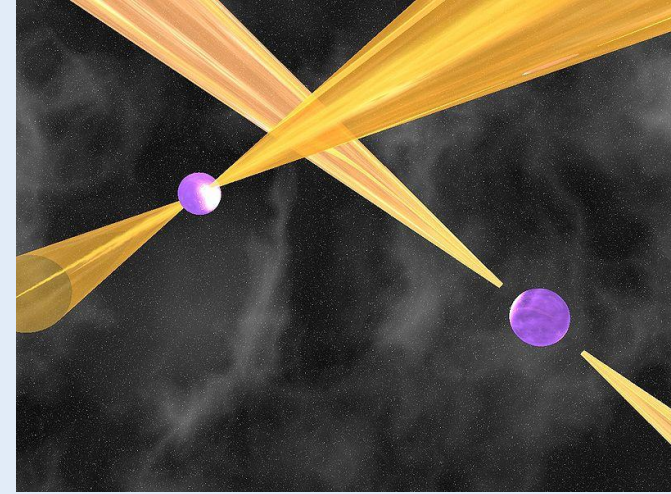
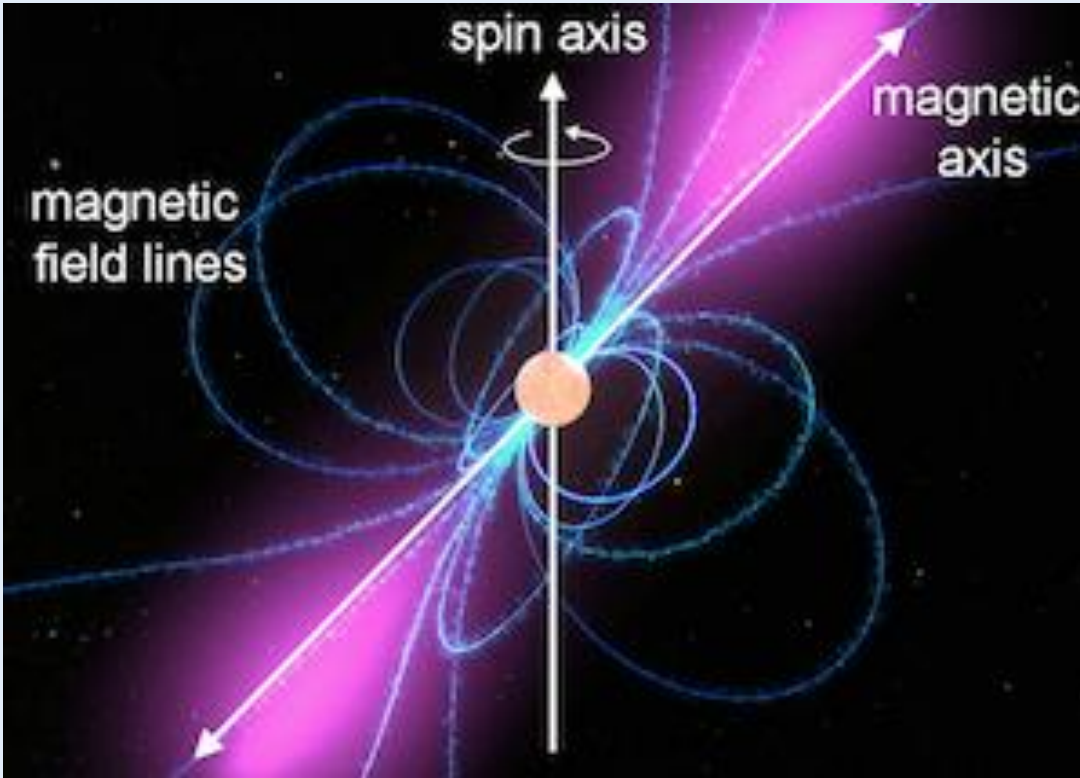


## Le Nobel pour la découverte (indirecte)

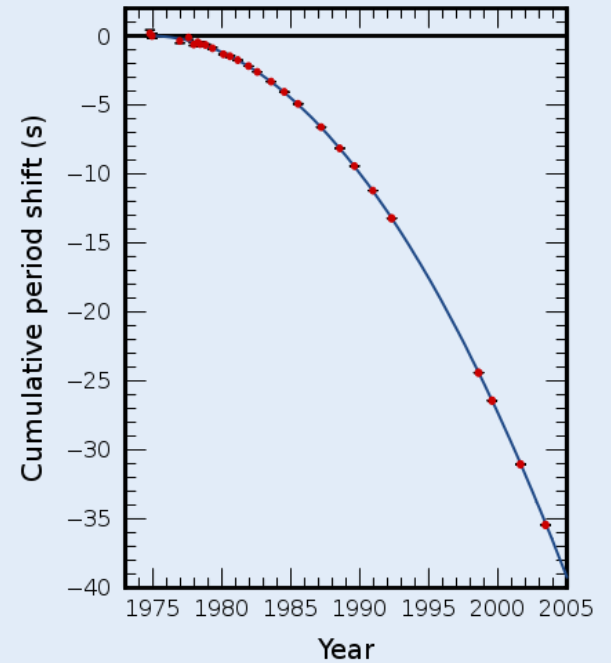
Joseph Hooton Taylor et Russell Hulse. (1993) montrent que l'accélération du raccourcissement de la période du **pulsar double PSR B1913+16** correspond à la perte d'énergie du système par émission d'ondes gravitationnelles, telle que prévue par la RG.



# Pulsar (étoile à neutron)



pulsar double PSR B1913+16



Pulsar double : perte d'énergie orbitale par émission d'OG

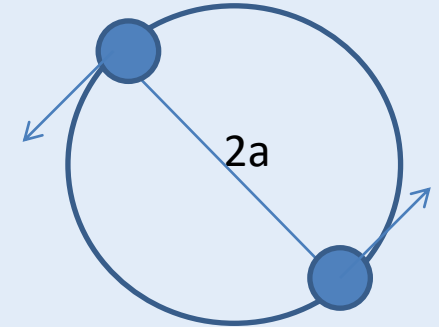
# Pourquoi les deux pulsars PSR B1913+16 se rapprochent ?

Modèle très simplifié : 2 masses égales  $m_1 = m_2 = m$ , séparées de  $2a$   
En orbite autour du centre de gravité du couple.

$$f_{grav} = G \frac{m^2}{(2a)^2} = f_{centr} = m \frac{v^2}{a} \Rightarrow mv^2 = G \frac{m^2}{4a}$$

$$E_{cin} = 2 \frac{mv^2}{2} = G \frac{m^2}{4a} \quad E_{pot} = -2G \frac{m^2}{4a}$$

$$E_{meca} = E_{cin} + E_{pot} = -G \frac{m^2}{4a}$$



Si l'énergie mécanique totale (cinétique+potentielle)  $E_{meca}$  diminue alors  $a$  diminue.

Règle : l'énergie d'un système en orbite varie comme  $(-1/2a)$

Pour « monter » vers Jupiter, il faut fournir de l'énergie à un engin

Pour « descendre » vers le Soleil, il faut lui en enlever (freiner, BEPICOMBO)

TOUT système double **rayonne** de l'énergie par des OG

Son énergie totale diminue (plus négative) → La séparation  $2a$  diminue

La période orbitale  $T^2 = ka^3$  diminue  
(3eme loi de Kepler)

## OG : De la découverte à l'observation

LIGO (\*,\*\*): Prouesse technico-scientifique majeure + Coup de chance

« Observatoires » d'un genre complètement nouveau



LIGO Hanford (Wa)



LIGO Livingston (La)

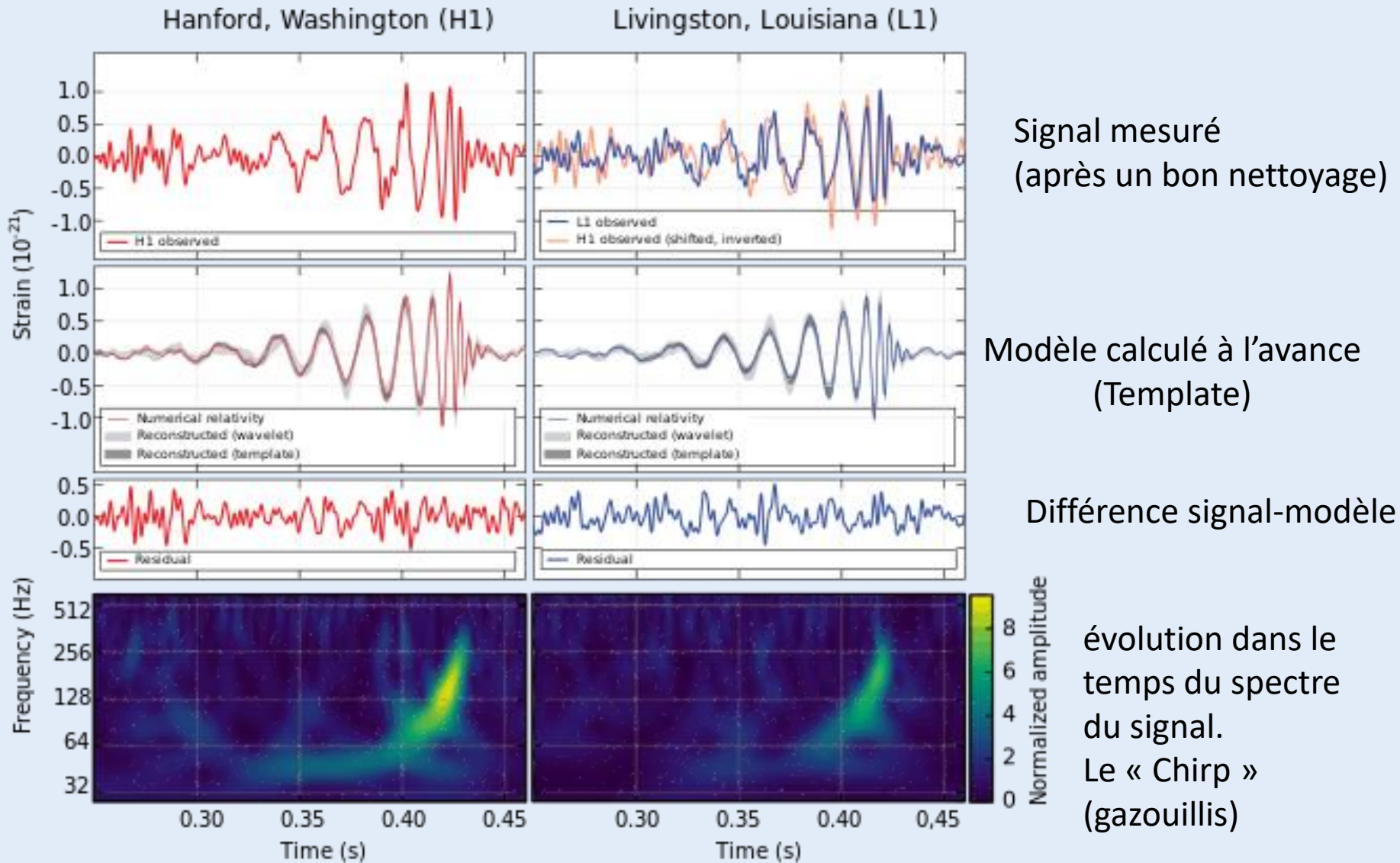


VIRGO (Italie)

\*LIGO : Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

\*\* λιγο = juste un peu ! ein bisschen, just a bit, un poco ... etc.

# GW 150914 (2015-sept-14) 1ère observation directe d'une onde gravitationnelle



Le spectre de fréquence du signal, codé en jaune, évolue avec le temps  
→ difficile à analyser

GW150914 : on assiste à la « coalescence » de 2 trous noirs

$36 M_{\odot} + 29 M_{\odot} \rightarrow 62 M_{\odot} + 3 M_{\odot}$  d'énergie dans une bouffée de 0,2 sec d'OG

qui atteint la Terre après un voyage de  $1,3 \pm 0,6$  milliard d'années(-lumière)  
(600 fois la distance de la galaxie d'Andromède)  
(Ce n'est pas si loin que ça !)



[https://www.youtube.com/watch?v=I\\_88S8DWbcU](https://www.youtube.com/watch?v=I_88S8DWbcU)

## GW150914 : On en tire quoi ?

- On savait que les OG, prédites par la théorie, existent (pulsar binaire Nobel 1993)
- Cette fois on a pu les détecter.
- Il existe des trous noirs de quelques dizaines de  $M_{\odot}$ . (Ca, c'est un peu nouveau !)
- Ils peuvent former un système binaire et fusionner dans le temps de Hubble (15 Gans).
- La forme de l'OG confirme les prédictions théoriques (forme du signal prévue à l'avance).
- Flash d'énergie énorme  $\approx 3M_{\odot} \rightarrow (3 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}) \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m sec}^{-1})^2 \approx 2 \cdot 10^{47} \text{ J}$   
(énergie lumineuse rayonnée par les  $10^{11}$  étoiles de la Galaxie pendant 100 ans !)
- On a un laboratoire pour **tester les prédictions de la RG en « champ fort »**

# Traits communs des sources d'OG détectées

Catalogue GWTC-1 (30-11-2018) <https://arxiv.org/abs/1811.12907>

Toutes les sources d'OG détectées à ce jour ont en commun :

Des systèmes doubles qui se rapprochent (perte d'énergie)

Et finissent par fusionner (coalescence) :

De 2 trous noirs (10 détections dans le catalogue LIGO)

OU

De 2 « étoiles à neutrons » (1 détection)

Qui tournent de plus en plus vite avant leur coalescence

On distingue 3 phases dans le phénomène :

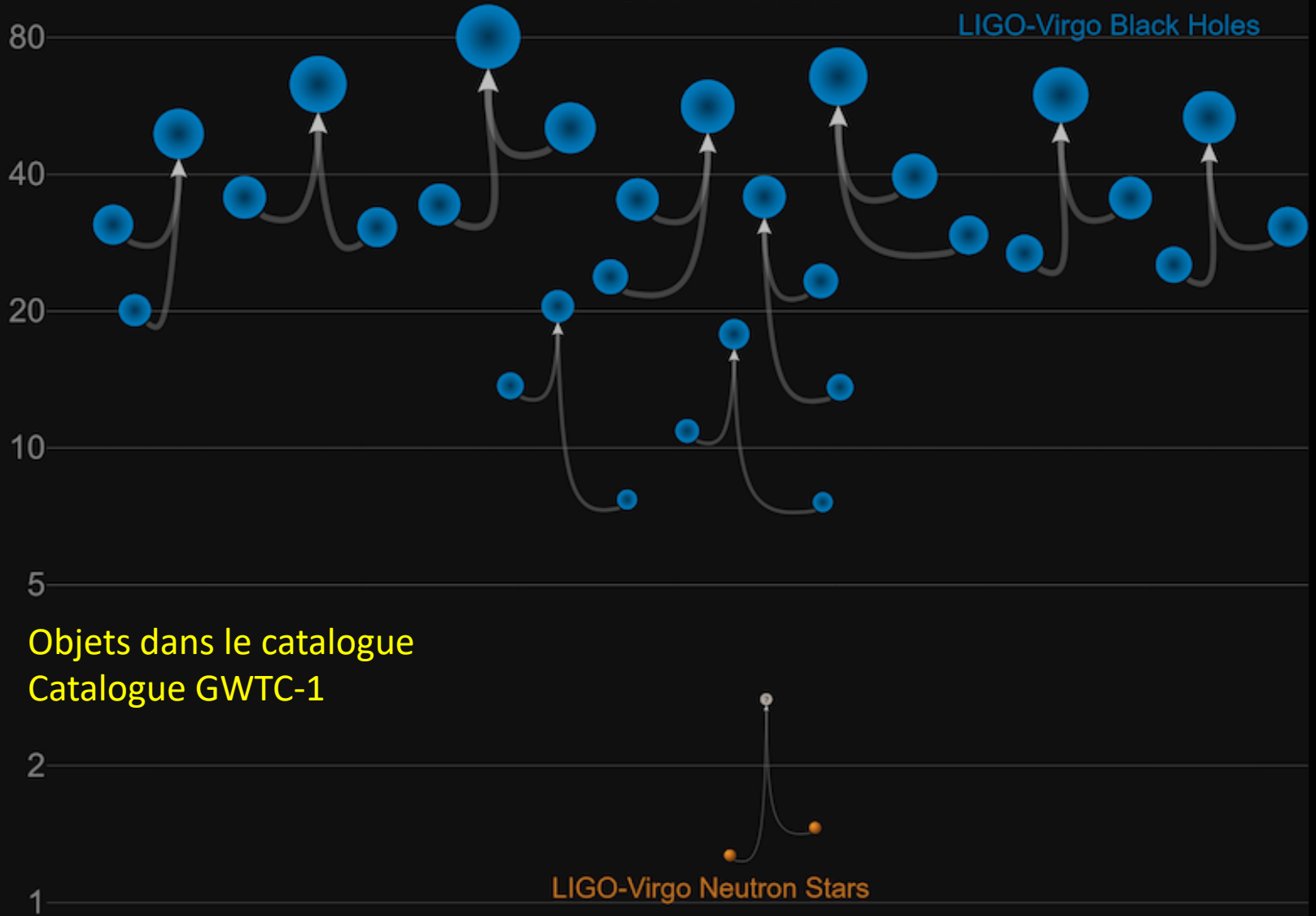
Spirale (inspiral) : fréquence assez stable

coalescence (merger) : la fréquence augmente très vite,

stabilisation (ringdown) : le signal s'éteint

# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



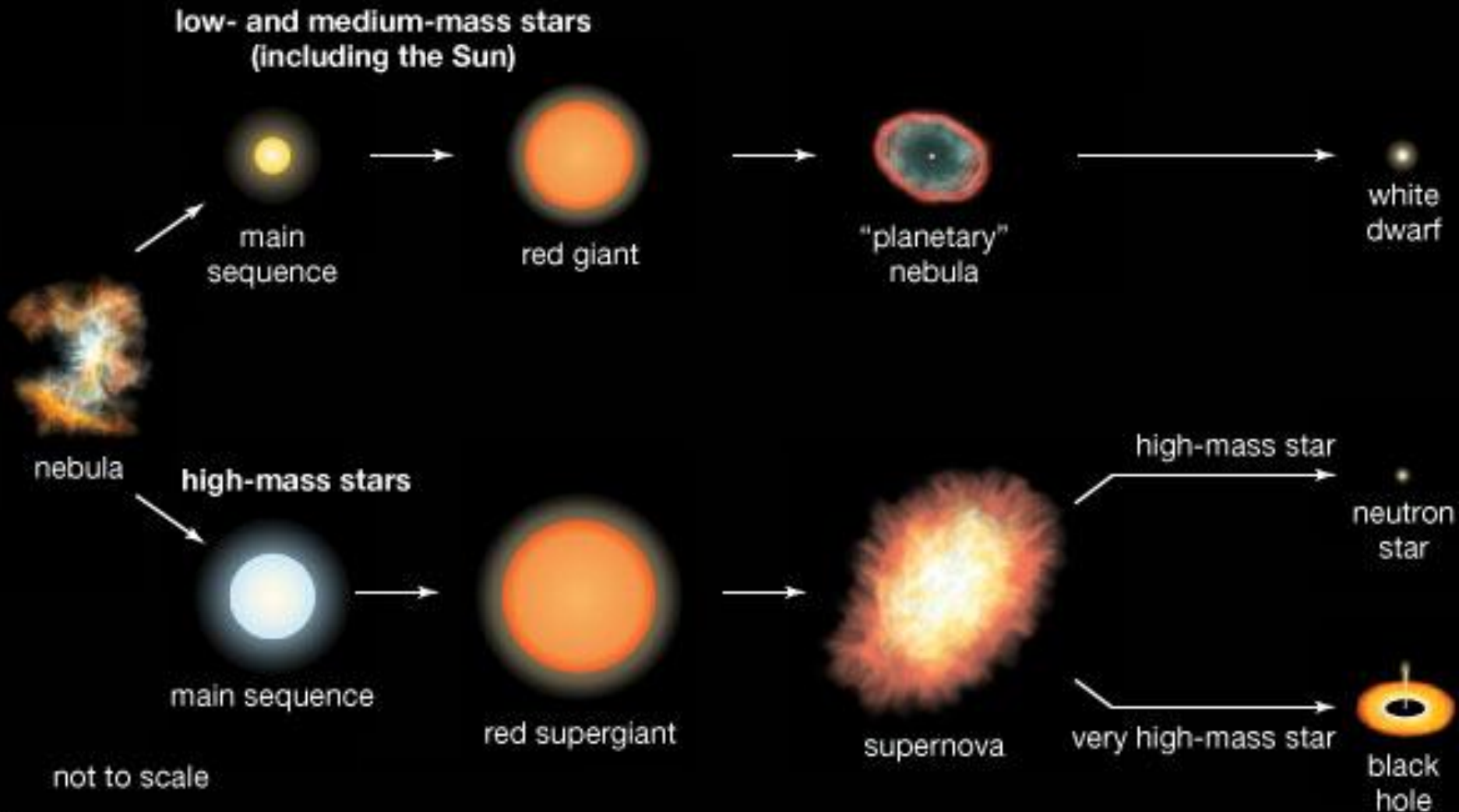


# OBJETS COMPACTS SUSCEPTIBLES DE GÉNÉRER DES OG

Evolution des étoiles : phases finales compactes et faiblement lumineuses

Etoile massive → Super géante rouge → Supernova (effondrement) → TN , étoile à neutron

## Stellar evolution



# Étoiles à neutrons et étoiles de quarks = étoiles denses

Effondrement gravitationnel du cœur de fer lors de la supernova ⇒ petite taille de l'objet résidu



## Étoile à neutrons :

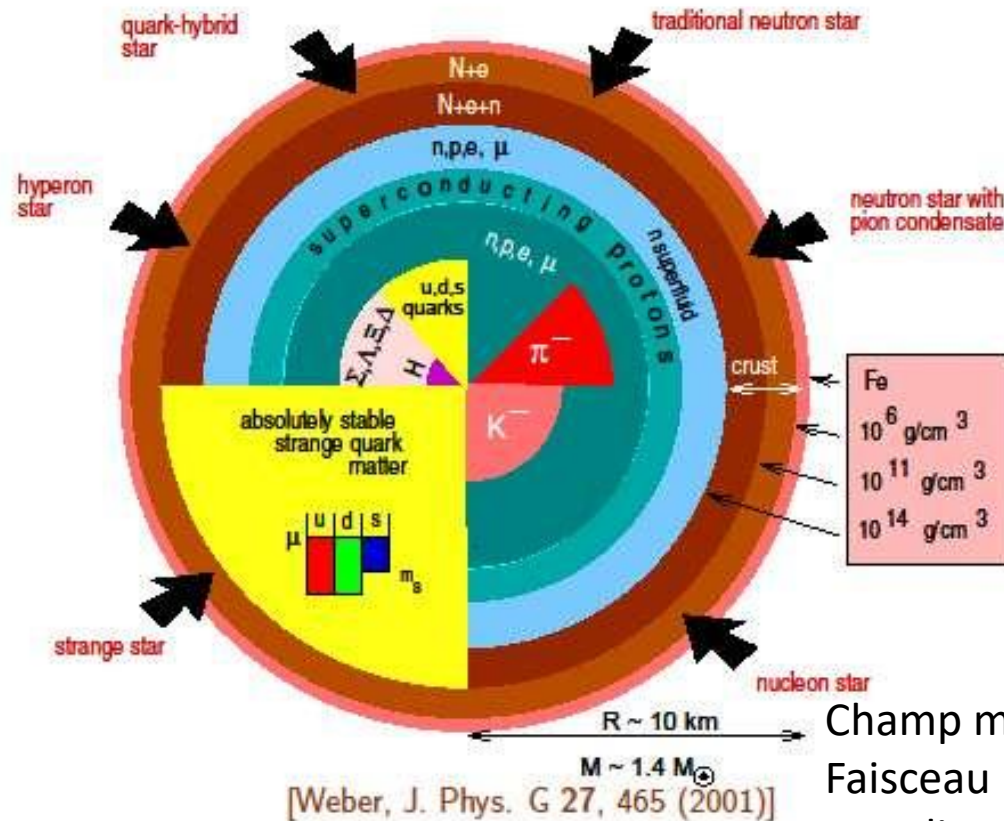
$R \sim 10 \text{ km}$

$M \sim 1.4 M_{\odot}$

$\rho_c \sim 2 - 10 \rho_{\text{nuc}}$

$(\rho_{\text{nuc}} := 2 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3})$

⇒ intérieur régi par l'interaction forte (QCD)



[Weber, J. Phys. G 27, 465 (2001)]

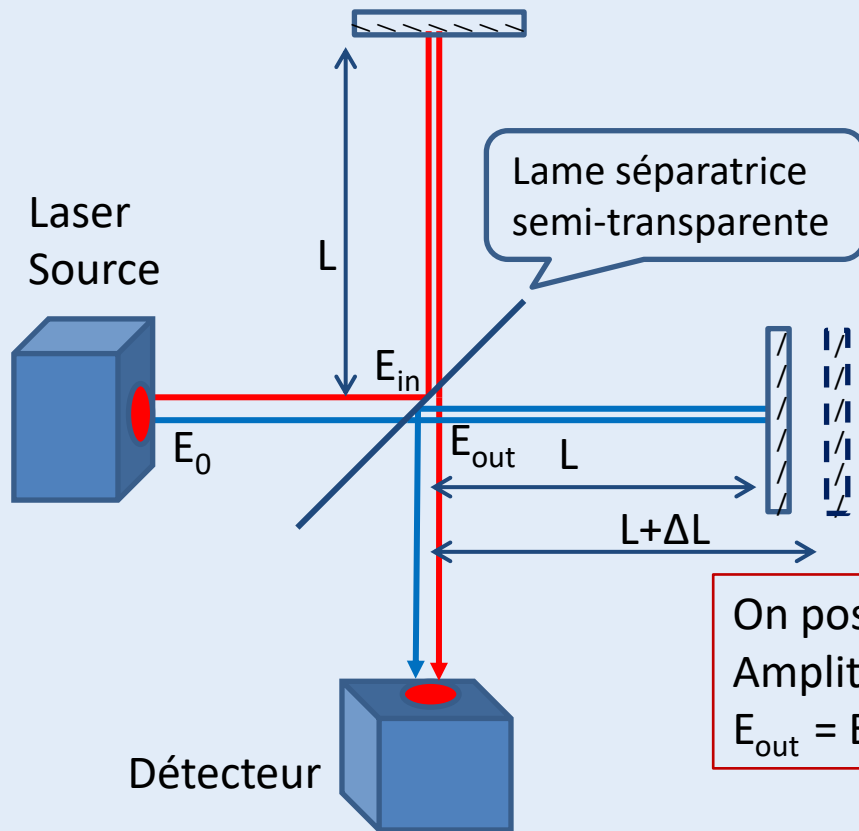
Champ magnétique fort  $10^{10}$  Tesla  
 Faisceau radio dans l'axe du champ (jet)  
 pas aligné avec l'axe de rotation → Pulsar  
 Étoile double → (rarement) paire d'étoile à N

Les nouveaux observatoires :

LIGO (Hanford et Livingston ) VIRGO (Italie)

Et d'autres qui suivront ...

# Interféromètre Michelson = comparateur de deux longueurs



Longueur bras X =  $L + \Delta L$

Longueur du bras Y =  $L$

Amplitude d'entrée, juste avant 1° réflexion sur la séparatrice :  $E_{in} = E_0 \cos(\omega t)$

Sur la séparatrice, après un aller-retour :

rouge  $E_1 = (1/4) E_0 \cos(\omega t + 2\pi (2L/\lambda))$

bleu  $E_2 = (1/4) E_0 \cos(\omega t + 2\pi (2(L+\Delta L)/\lambda))$

On pose :  $\varphi = 4\pi L/\lambda$

$\Delta \varphi = 4\pi \Delta L/\lambda$

Amplitude de sortie, juste après la séparatrice :

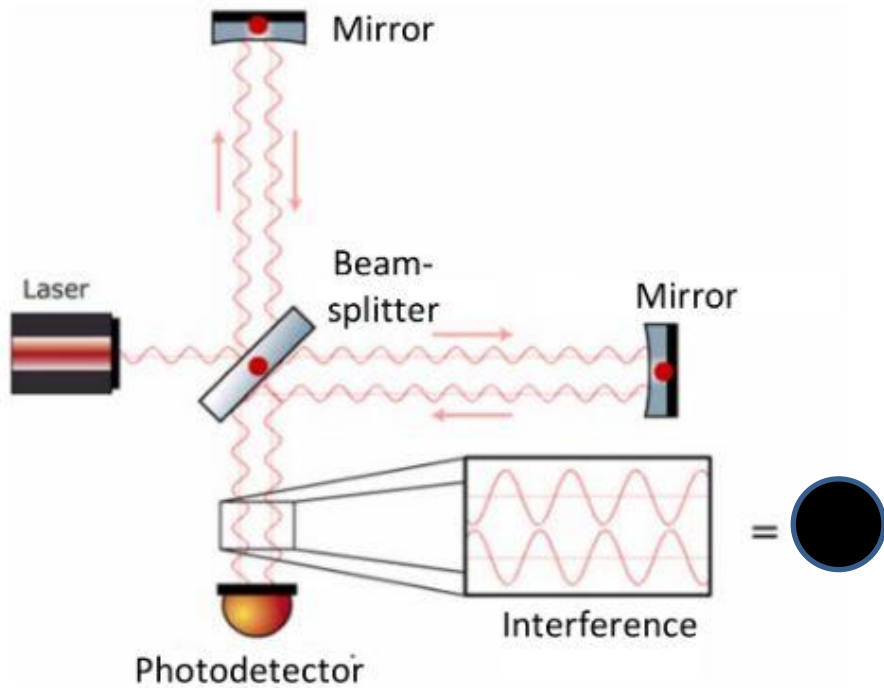
$E_{out} = E_1 + E_2 = (1/2) E_0 \cdot \cos(\Delta \varphi / 2) \cdot \cos(\omega t + (\varphi + \Delta \varphi)/2)$

On ne s'intéresse qu'à l'amplitude à la sortie :  $[E_{out}] = (1/2) E_0 \cos(\Delta \varphi / 2)$

Dérivée de cette amplitude par rapport à  $L$  :  $[dE_{out}/dL] = -(1/2) E_0 \sin(\Delta \varphi / 2) 4\pi / \lambda$

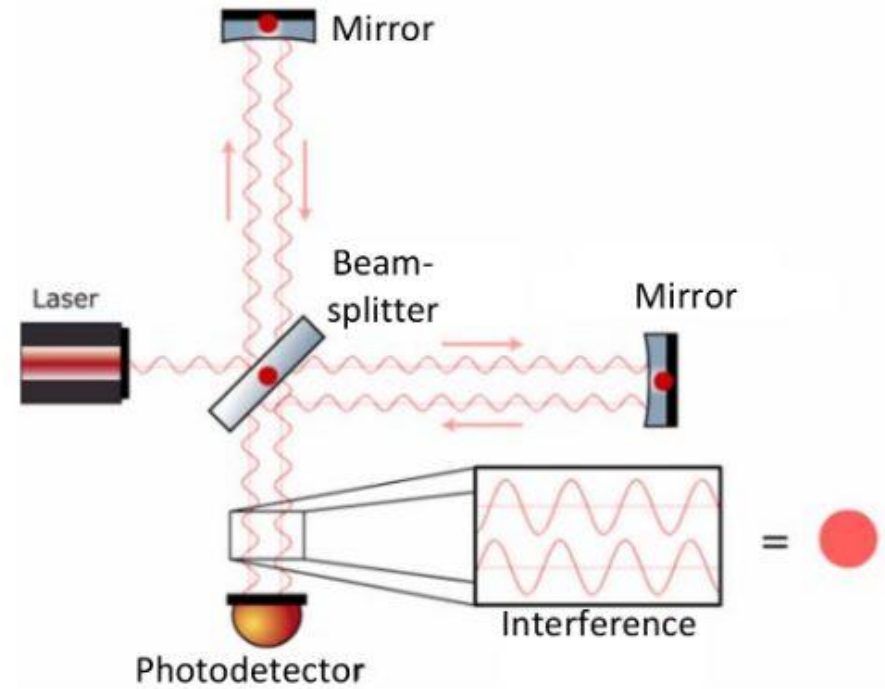
$[dE_{out}/dL]_{max} = 2\pi E_0 / \lambda$  pour  $\Delta \varphi / 2 = \pi/2$  ou  $\Delta L = \lambda/4$  (frange sombre)

Interféromètre réglé sur une frange sombre en l'absence de perturbation



$I = 0$  dans la photodiode

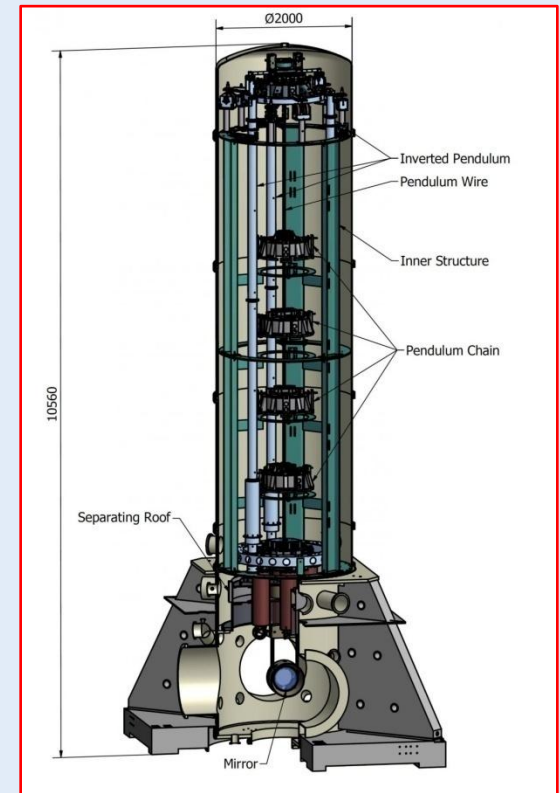
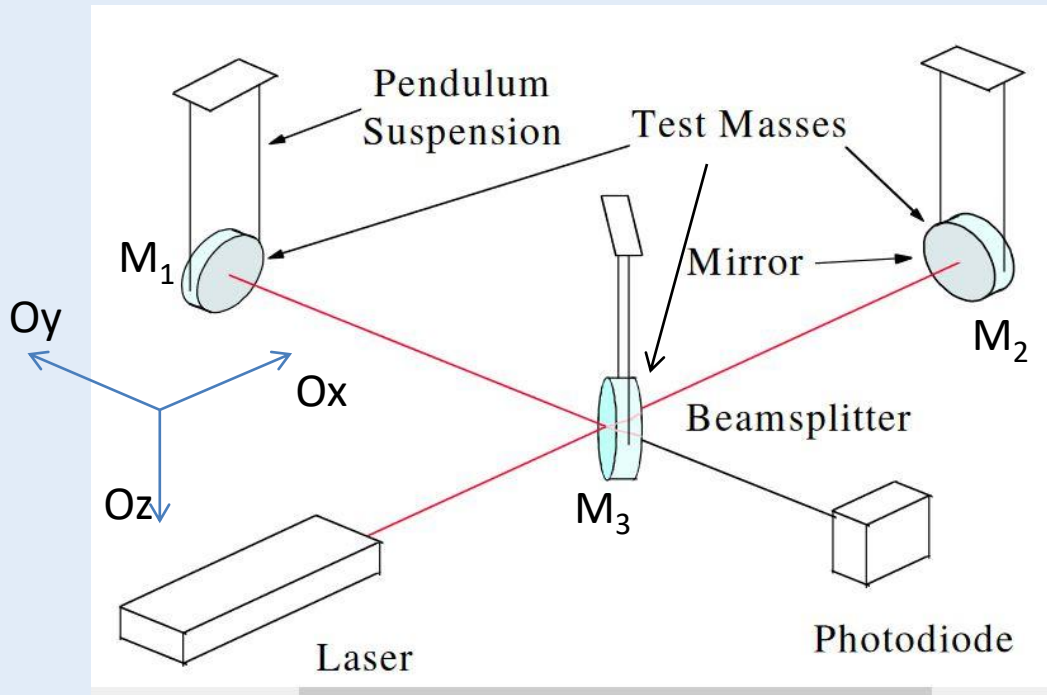
Déséquilibre  $\Delta L$  entre les 2 bras  
→ écart à la frange sombre



$I \neq 0$  dans la photodiode

## Concept de base d'un interféromètre pour OG

- Système « en état de chute libre » constitué de 2 paires de masses-test entre  $M_1$ ,  $M_2$  et  $M_3$  (séparatrice+laser).
- Isolé de toute perturbation mécanique extérieure (son, sismique, camion etc. )
- OG = seule perturbation qui puisse modifier les distance  $M_1 - M_3$  et  $M_2 - M_3$  .
- L'onde incidente se propage selon Oz.



Isolation des vibrations du sol  
principe du pendule multiple

## Calcul de la perturbation du Michelson par l'OG

Plutôt que de calculer des longueurs, on calcule des temps de parcours des bras  
dans le référentiel de la séparatrice

On considère une OG se propageant selon l'axe  $\overline{Oz}$ , perpendiculaire au plan du Michelson

$$\text{Equation de la métrique dans le repère de la séparatrice : } ds^2 = -cdt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (1)$$

Dans l'approximation d'une très petite distortion  $h(t)$  de la métrique par l'OG :

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + [1 + h(t)] dx^2 + [1 - h(t)] dy^2 + dz^2 \quad \text{avec } h(t) \ll 1$$

Le long d'un rayon lumineux entre deux points voisins :  $ds = 0$

Dans le plan xOy du Michelson, l'équation (1) devient :

$$c^2 dt^2 = [1 + h(t)] dx^2 + [1 - h(t)] dy^2$$

On considère un rayon lumineux parallèle à  $\overline{Ox}$ ,  $dy = dz = 0$

Avec l'approximation :

$$\sqrt{1 + h(t)} \approx 1 + \frac{1}{2} h(t) \quad \text{et} \quad \sqrt{1 - h(t)} \approx 1 - \frac{1}{2} h(t) \quad (\text{développement limité au 1er ordre de } \sqrt{1 \pm h(t)})$$

On calcule le temps  $t_{OMO}$  mis par la lumière pour faire un aller-retour dans un bras, soit 2 fois le trajet depuis la séparatrice (O) jusqu'au miroir masse de test (M)

$$t_{OMO} = \oint dt = \frac{1}{c} \oint \sqrt{1 \pm h(t)} dx = \frac{2}{c} \int_0^M \left( 1 \pm \frac{1}{2} h(t) \right) dx = t_0 \pm \delta t$$

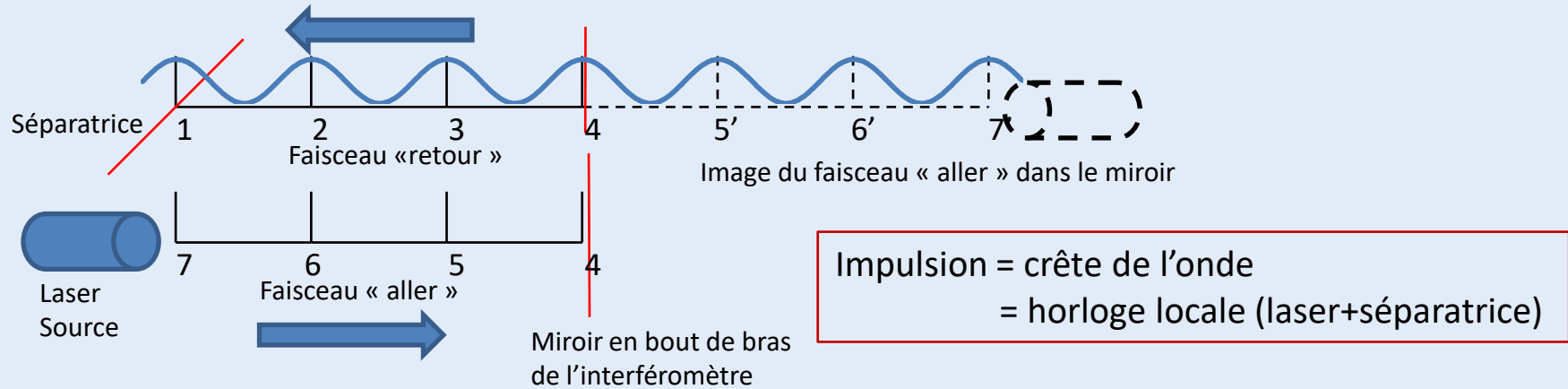
$$t_0 = \frac{2L}{c} = \text{Temps de parcours du bras non perturbé.}$$

$$\pm \delta t = \pm \frac{2}{c} \int_0^M \frac{1}{2} h(t) dx = \pm \frac{2Lh}{c} = \text{Perturbation qui va créer le déphasage entre les deux bras du Michelson}$$

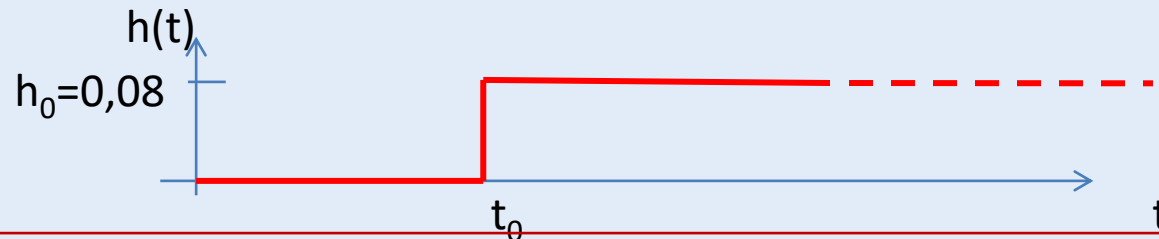
On remplace  $h(t)$  par  $h$  constant, car  $h(t)$  varie très peu pendant le temps d'aller retour de la lumière dans le bras

## Réponse impulsionnelle du michelson à une OG

Etat du bras Ox, à l'instant  $t_0$ , juste **avant** l'arrivée de l'OG qui va dérégler le Michelson



On fait passer une OG **élémentaire** en forme de marche à l'instant  $t_0$ , **Après** la marche de l'OG, toutes les distances mesurées à partir de la séparatrice sont multipliées (par ex :  $(1+h_0)=1,08$ )

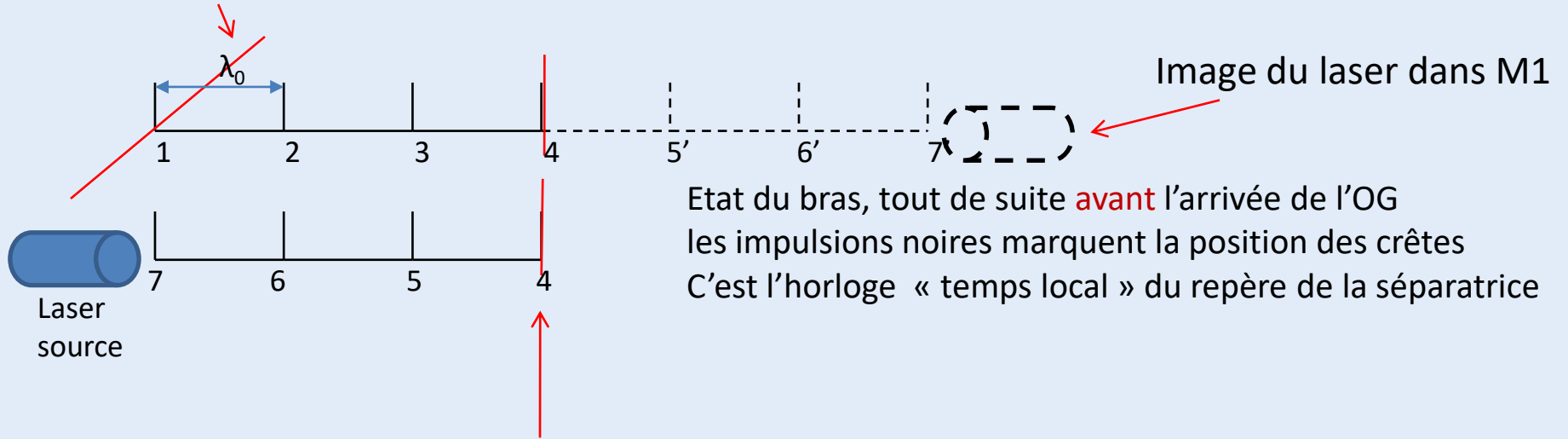


Quiz

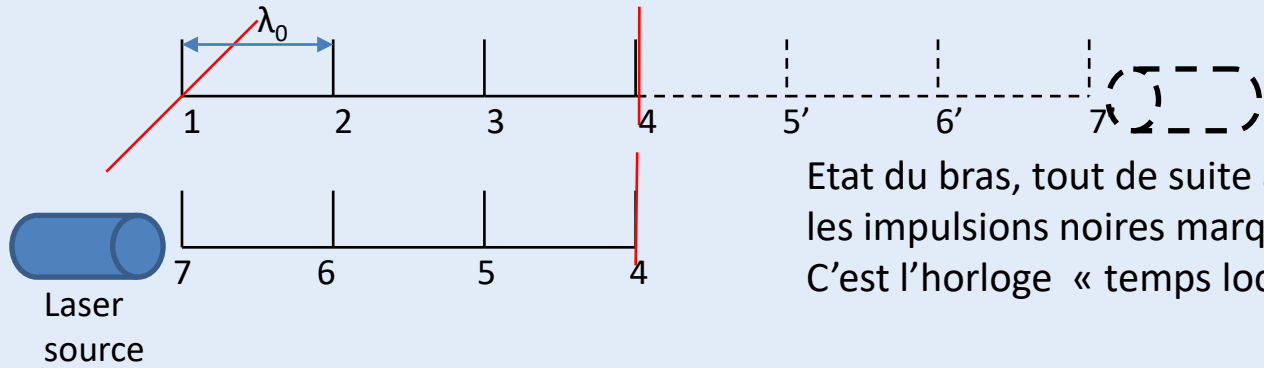
- 1- Une règle infiniment rigide placée dans le bras X entre la séparatrice et M1 serait-elle « dilatée » par  $(1+h_0)$  ?
- 2- Avant  $t_0$ , Le bras est rempli par un train d'onde de la lumière du laser, sur la fig.: 6 longueurs d'onde  $\lambda_0$ . Après  $t_0$  ces ondes seront-elles « dilatées » à  $\lambda = \lambda_0(1+h_0)$  ?



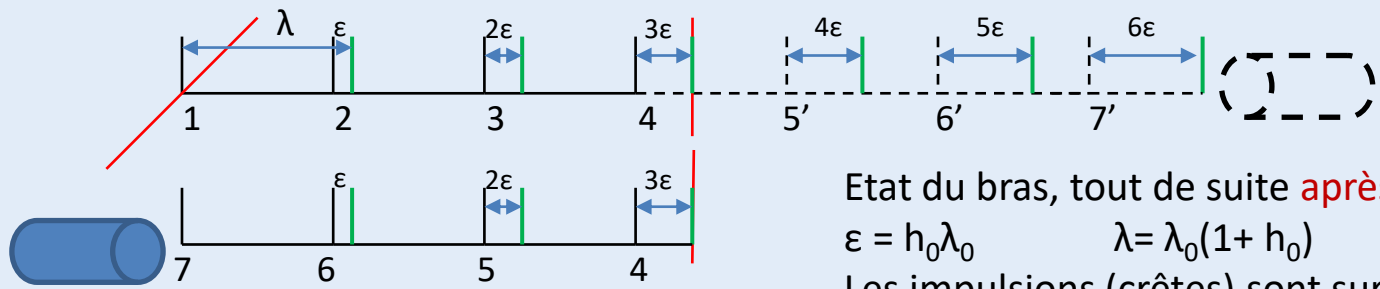
# Plan de la séparatrice



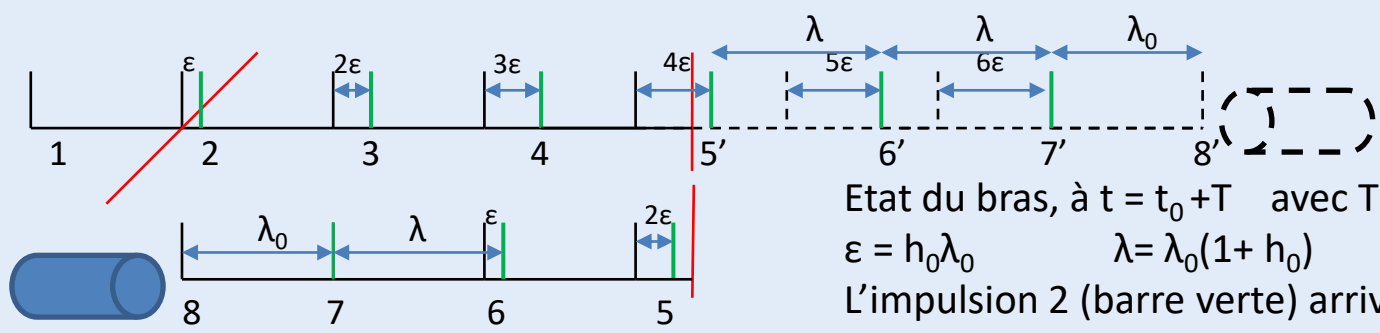
# Plan du miroir M1



Etat du bras, tout de suite **avant** l'arrivée de l'OG  
 les impulsions noires marquent la position des crêtes  
 C'est l'horloge « temps local » du repère de la séparatrice



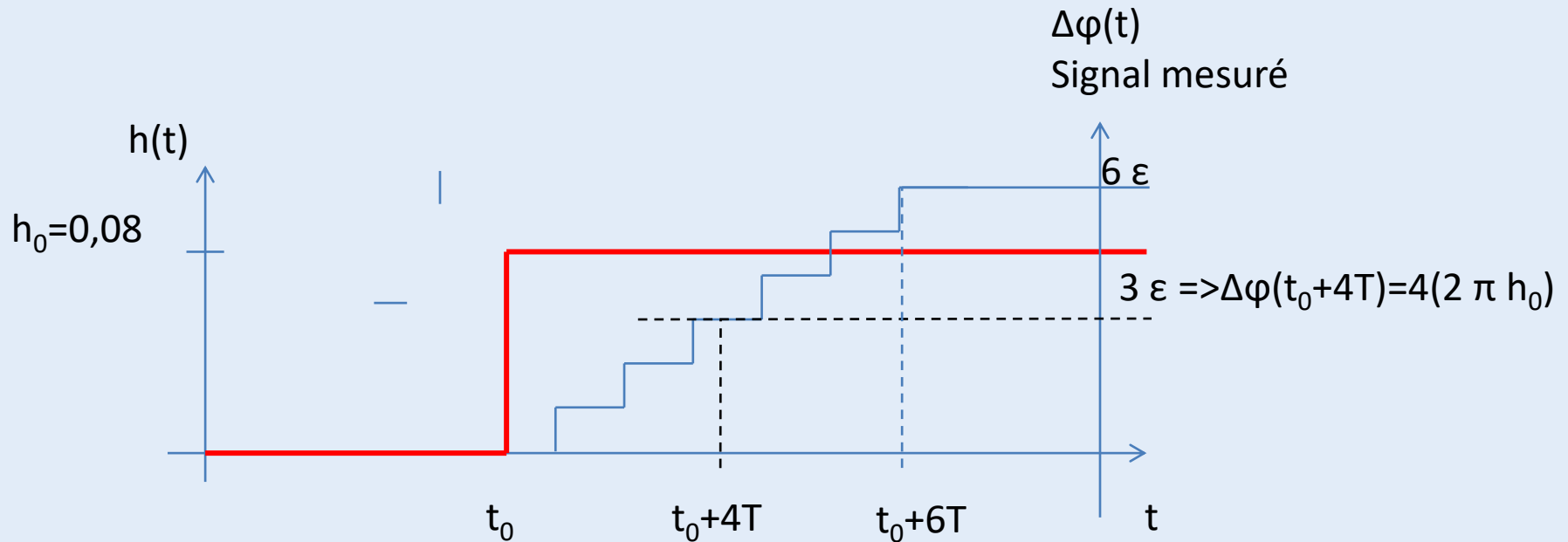
Etat du bras, tout de suite **après** l'arrivée de l'OG  
 $\epsilon = h_0 \lambda_0$        $\lambda = \lambda_0(1 + h_0)$        $t = t_0$   
 Les impulsions (crêtes) sont sur les barres vertes



Etat du bras, à  $t = t_0 + T$  avec  $T = \lambda_0/c$   
 $\epsilon = h_0 \lambda_0$        $\lambda = \lambda_0(1 + h_0)$   
 L'impulsion 2 (barre verte) arrivera sur  
 la séparatrice avec un retard de  $\epsilon/c$

à  $t = t_0 + nT$  L'impulsion  $n+1$  (barre verte) arrivera sur  
 la séparatrice avec un retard de  $n\epsilon/c$  qui provoque le  
 déphasage des bras (retard  $n\epsilon/c$  dans le bras X, avance  $n\epsilon/c$   
 dans le bras Y)

## Réponse en fréquence du Michelson



Durée de vie du photon dans le bras  $\tau = T \times 2L/\lambda_0$

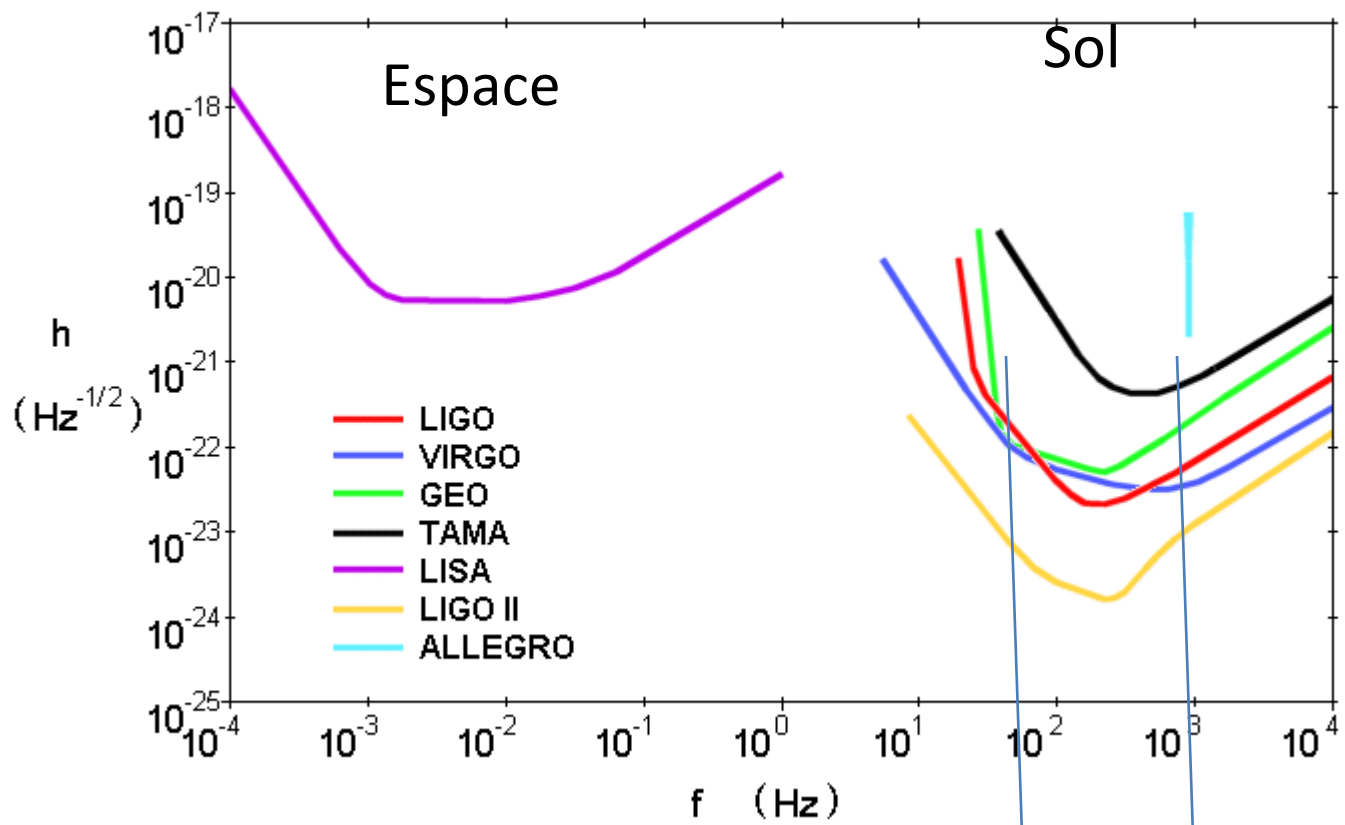
$T = v/c$  Période de la lumière émise par le laser

$2L/\lambda_0 = N$  = nombre d'ondes contenues dans  $2L$  l'aller-retour d'un bras

Le déséquilibre des deux bras met un temps  $= \tau = T \times 2L/\lambda_0$  pour s'établir

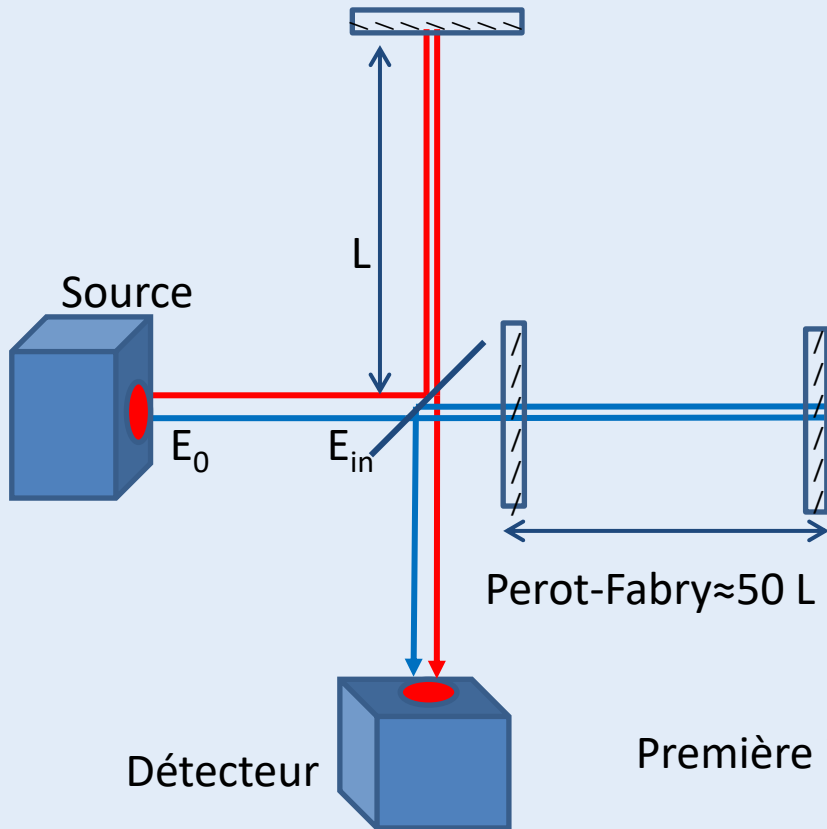
Limitation aux hautes fréquences : si la durée caractéristique du phénomène est  $< \tau$

**Conclusion : un Michelson est un filtre passe bas pour les OG**



Domaine de performance optimale

## Comment gagner en sensibilité ?



Sensibilité limite du michelson :

L = longueur des bras

P = puissance lumineuse dans le faisceau

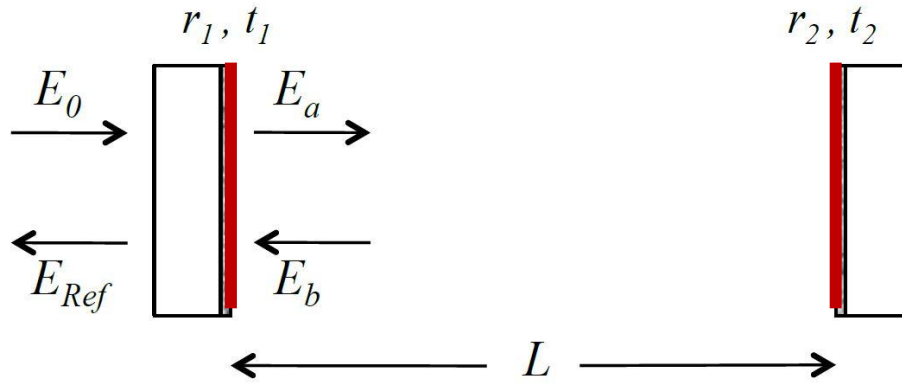
$$h_{\min} \approx \frac{1}{L} \frac{1}{\sqrt{P}}$$
$$\frac{S}{B} = \frac{h}{h_{\min}}$$

Première idée : « allonger » L

2 fois 3 ou 4 km de tube : c'est cher

1° Astuce : insérer un circuit Perot-Fabry dans les bras

# Perot-Fabry résonant (utilisé comme miroir)



$$E_a = t_1 E_0 - r_1 E_b$$

$$E_b = -r_2 e^{i\phi} E_a$$

$$E_{\text{Ref}} = r_1 E_0 + t_1 E_b$$

$$E_a = \frac{t_1}{1 - r_1 r_2 e^{i\phi}} E_0,$$

$$E_b = -\frac{t_1 r_2 e^{i\phi}}{1 - r_1 r_2 e^{i\phi}} E_0,$$

$$E_{\text{Ref}} = \frac{r_1 - r_2 e^{i\phi}}{1 - r_1 r_2 e^{i\phi}} E_0.$$

Par construction :

$$r_2 = 1$$

$$1 - r_1 = \delta r_1 \ll 1$$

$$\phi = 2\pi N = 4\pi L/\lambda$$

$$N = 2L/\lambda \text{ entier} \rightarrow e^{i\phi} = 1$$



$$E_a \approx \frac{t_1}{1 - r_1} E_0,$$

$$E_b \approx -\frac{t_1}{1 - r_1} E_0,$$

$$E_{\text{Ref}} \approx -E_0.$$

NB : avec des séries de couches minces déposées sur la surface du miroir, on ajuste  $r_1$  et  $r_2$  pour la longueur d'onde du laser.

On dérive  $E_{ref}$  par rapport à  $L$ , en régime résonant :  $\phi = 2\pi N \rightarrow e^{i\phi} = 1$

$$\left[ \frac{dE_{Ref}}{dL} \right]_{\phi=2\pi N} = -i \frac{(1 - r_1^2) r_2}{(1 - r_1 r_2)^2} \frac{2\pi}{\lambda} E_0$$

Dans l'approximation :  $r_2 \rightarrow 1$  et  $\delta r_1 \equiv 1 - r_1 \ll 1$

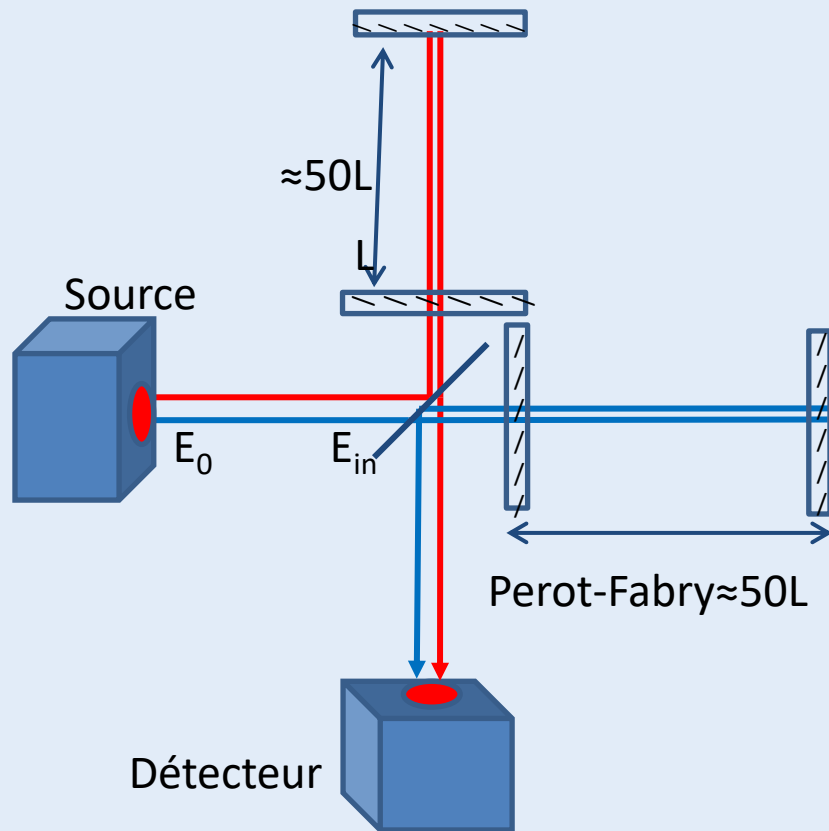
$$\left[ \frac{dE_{Ref}}{dL} \right]_{\phi=2\pi N} \approx -i \frac{2}{\delta r_1} \frac{2\pi}{\lambda} E_0,$$

A comparer avec le résultat obtenu pour un Michelson simple :

$$[dE_{out}/dL] = 2\pi E_0/\lambda$$

- On voit apparaître **un gain sur le Michelson en  $(2/\delta r_1)$  de l'ordre de 50 à 100**
- En lui-même, ce Perot-Fabry pourrait déjà servir de détecteur d'OG.
- Tout se passe comme si les photons entrés dans le F-P faisaient en moyenne  **$2/\delta r_1$**  aller-retour entre les 2 miroirs avant de sortir
- En pratique : on met un F-P dans chaque bras du Michelson

## Prix à payer pour le gain du Perot-Fabry



Pour faire 1 aller-retour de bras,  
la lumière met un temps  $\tau = 2L/c$

LIGO/VIRGO  $2L = 2 \times 3\text{km}$   
(Virgo)  $\rightarrow \tau = 0,02 \cdot 10^{-3} \text{ sec}$

Avec le Perot-Fabry, ce temps est multiplié par 50  
 $\tau_{\text{PF}} = 50 \times 0,02 \text{ msec } (10^{-3} \text{ sec}) \approx 1 \text{ msec}$

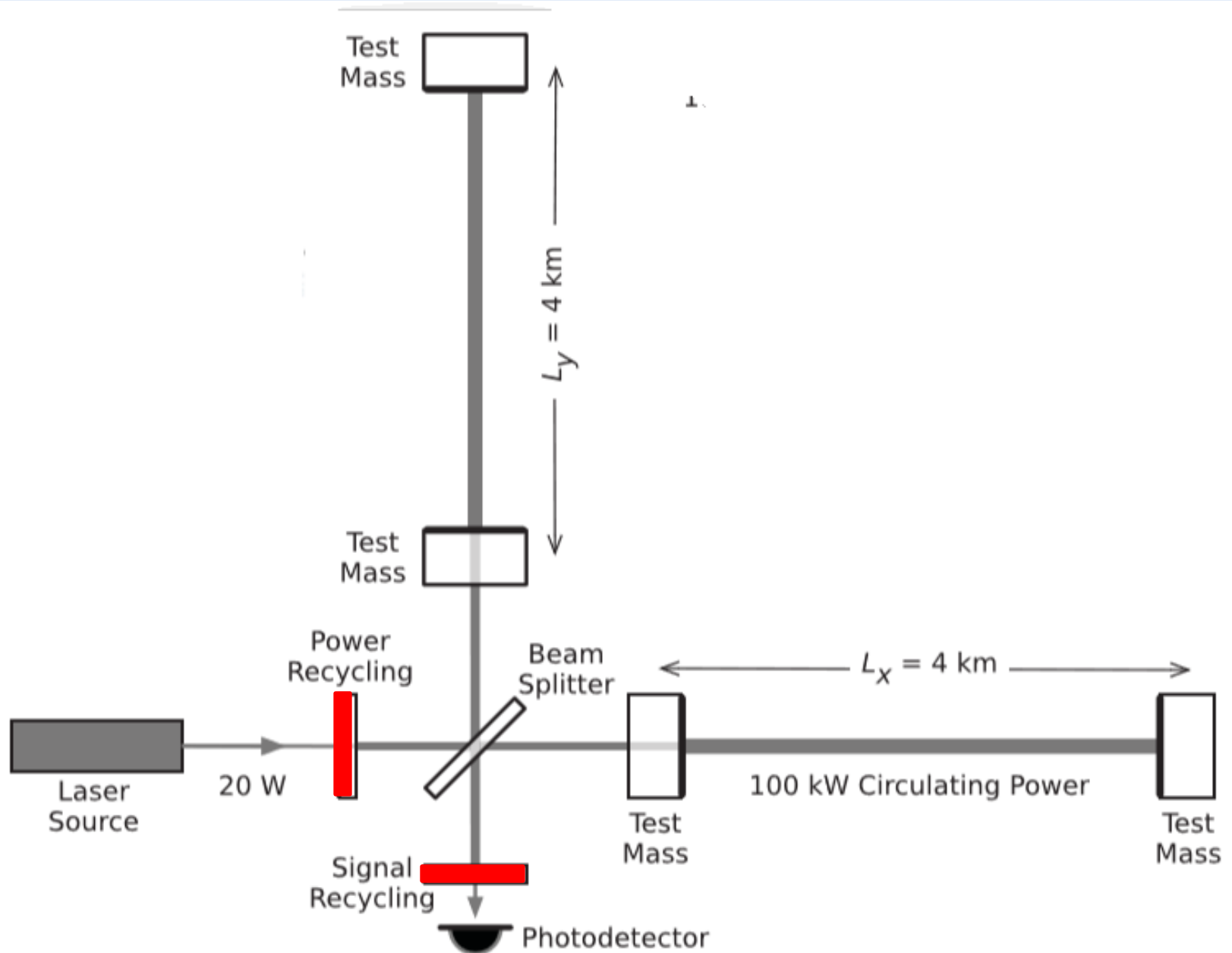
(On a 50 fois plus de temps pour faire agir l'OG  
sur l'espace entre la séparatrice et le miroir M1)

Mais les variations de l'OG plus rapide que 1msec  
commenceront à être difficiles à voir (filtrées passe-bas).

Coût = limitation de la bande passante dans les hautes fréquences  $\approx 1$  à  $2 \text{ kHz}$



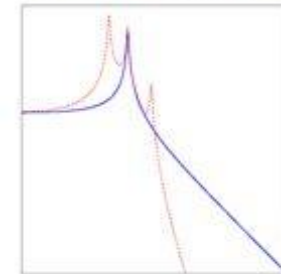
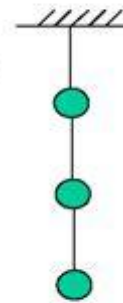
Pour finir : On ajoute des miroirs de « recyclage » qui augmentent la puissance



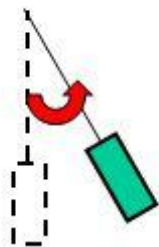
# Les bruits fondamentaux de Virgo

- **Vibrations acoustiques + fluctuations d'indice** dans le tube  
⇒ solution : faisceau laser et miroirs placés sous vide ( $10^{-8}$  mbar)

- **Bruit sismique** : basses fréquences  
Utilisation de Super-Atténuateurs (série de pendules en cascade)  
⇒ isolation sismique au-dessus de quelques Hz



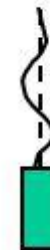
- **Bruit thermique** : mouvement aléatoire des miroirs relié à la dissipation d'énergie thermique



Bruit de pendule  
(→ 100 Hz)



Bruit de miroir  
(100-200 Hz)

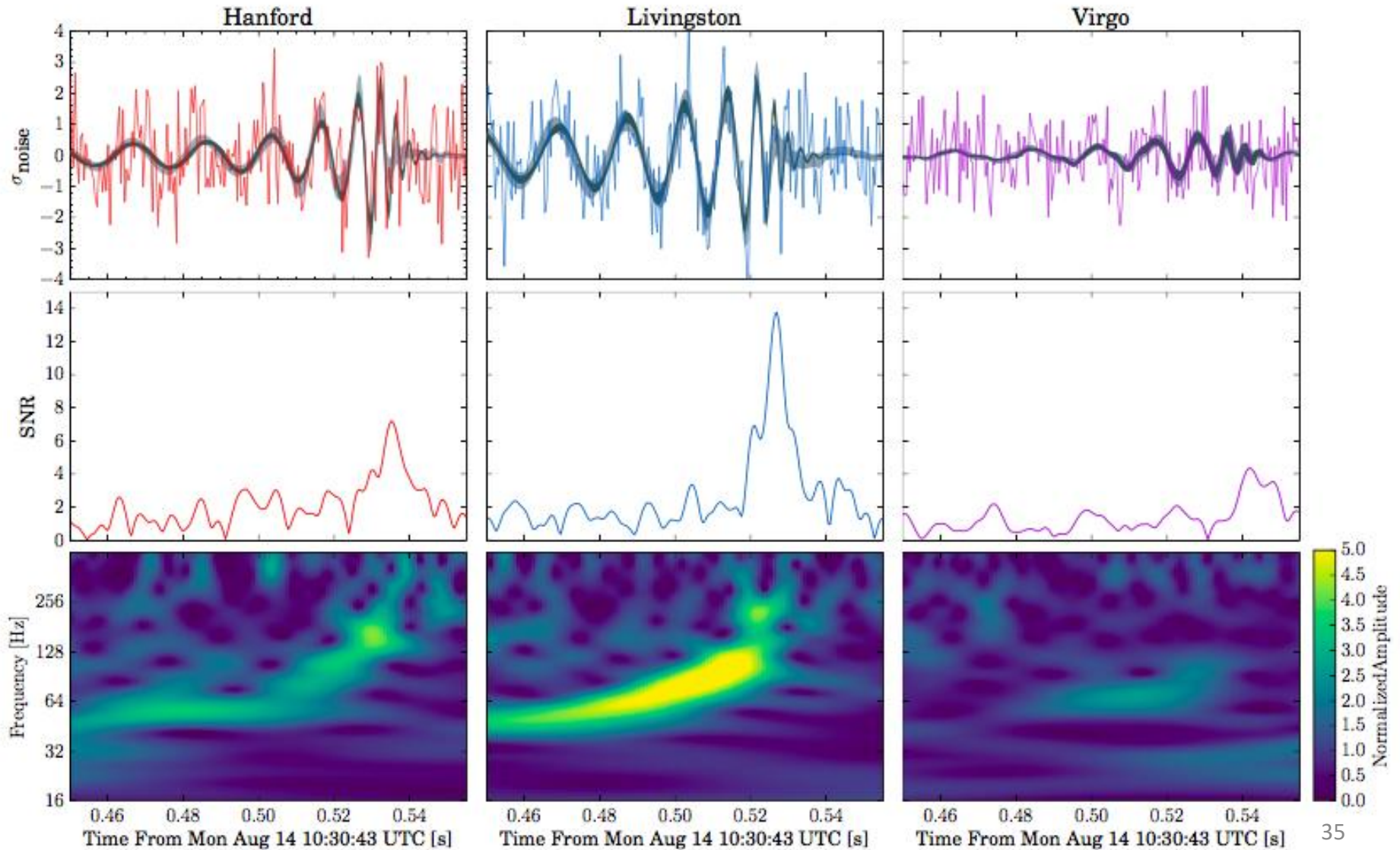


Modes violons (résonances hte  
fréquence)

- **Bruit de photons** (hte fréquence)

# GW170817 : Coalescence de deux étoiles à neutrons

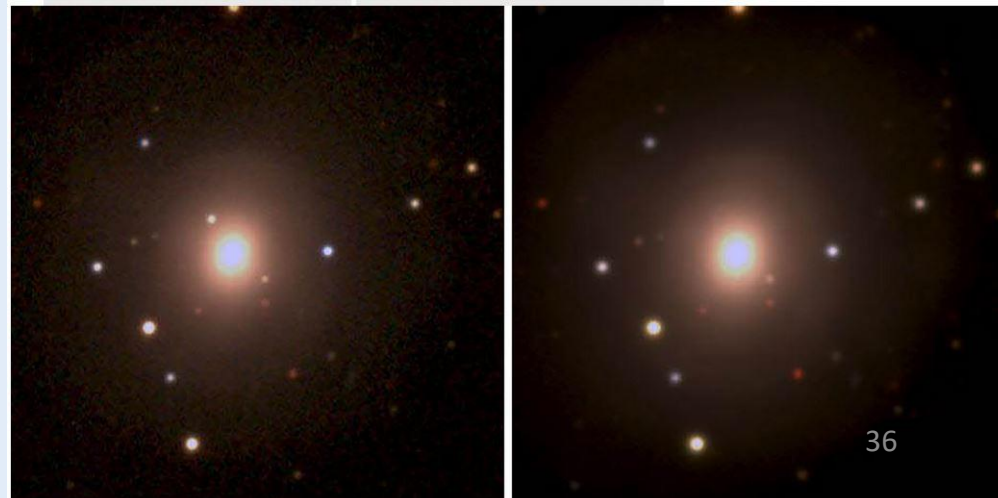
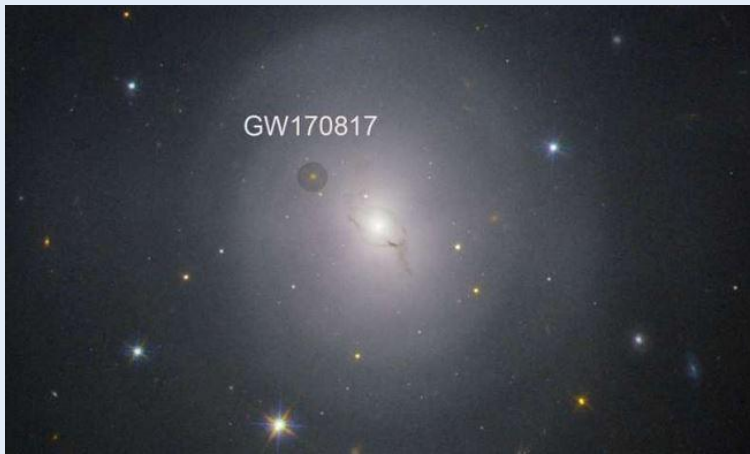
## Vue par 3 interféromètres



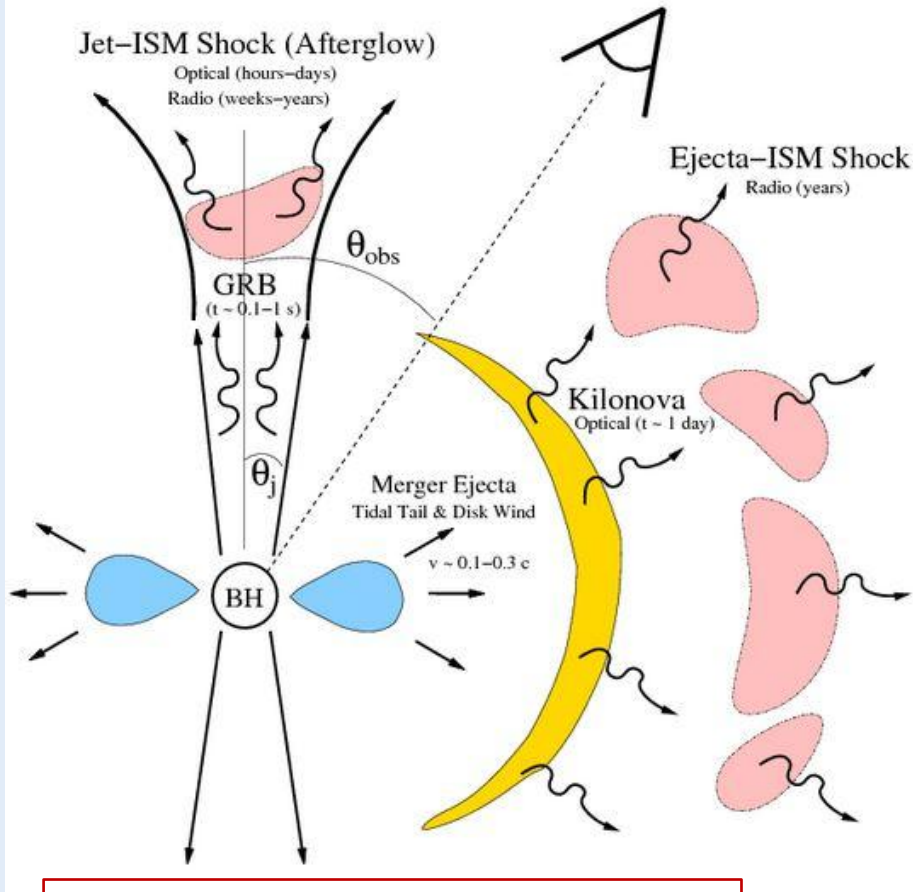
## GW170817 et l' Astronomie multi messager :

- **OG** Train d'onde de 200 sec (sinusoïde → forme connue, détection synchrone)
- GRB 170817A : **sursaut gamma** à la même heure observé par satellite FERMI.  
→ ALERTE aux observatoires (\*)
- Telescope Swope **localise une source de lumière**  
dans NGC 4993 (une galaxie ordinaire) qui décroît  
très vite
- Distance : 40 MPc (120  $10^6$ AL : 10 fois plus près que GW150914)

(\*) Voir D. Larousserie, Le Monde Science & médecine 28 nov 2018, ou M. Brook, New Scientist , 31 oct 2018



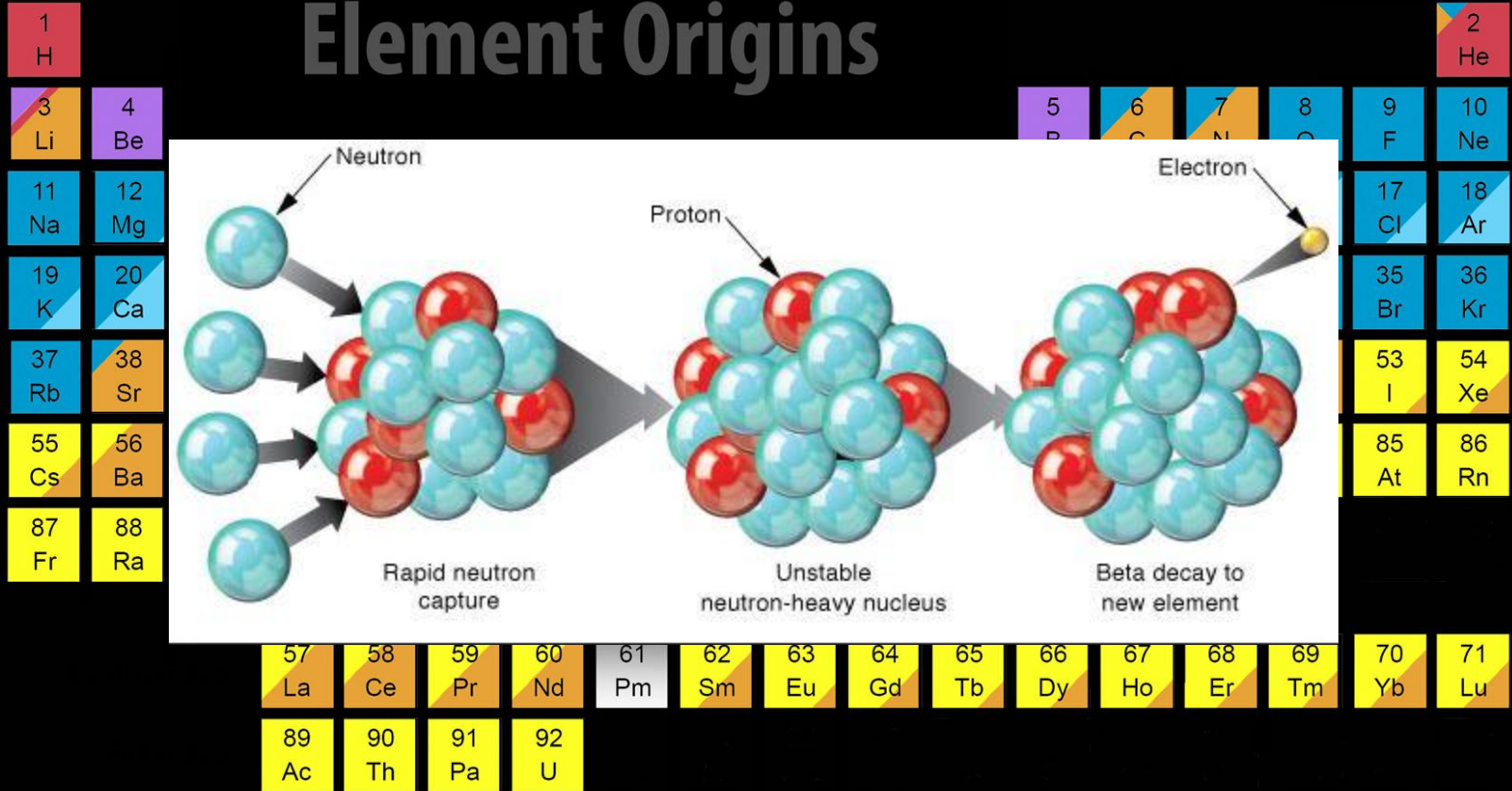
## Les suites d'une coalescence NS-NS



Summary of potential electromagnetic counterparts of NS-NS/NS-BH mergers discussed in this paper, as a function of the observer angle,  $\vartheta_{\text{obs}}$ . Following the merger a centrifugally supported disk (blue) remains around the central compact object (usually a BH). Rapid accretion lasting  $\lesssim 1$  s powers a collimated relativistic jet, which produces a short-duration gamma-ray burst. Due to relativistic beaming, the gamma-ray emission is restricted to observers with  $\vartheta_{\text{obs}} \lesssim \vartheta_j$ , the half-opening angle of the jet. Non-thermal afterglow emission results from the interaction of the jet with the surrounding circumburst medium (red). Optical afterglow emission is observable on timescales up to  $\sim$  days-weeks by observers with viewing angles of  $\vartheta_{\text{obs}} \lesssim 2\vartheta_j$ . Radio afterglow emission is observable from all viewing angles (isotropic) once the jet decelerates to mildly relativistic speeds on a timescale of weeks-months, and can also be produced on timescales of years from sub-relativistic ejecta. Short-lived isotropic optical emission lasting  $\sim$  few days (kilonova; yellow) can also accompany the merger, powered by the radioactive decay of heavy elements synthesized in the ejecta.

bleu : disque résiduel  
 pôle : sursaut gamma bref  
 rose : émission non thermique (radio)  
 dans le jet :  $\approx 1$  jour  
 dans toutes les directions  $\approx 1$  mois  
 jaune : kilonova,  $\approx$  qq jour, optique  
 désexcitation des éléments lourds

# Element Origins



**Merging Neutron Stars**  
**Dying Low Mass Stars**

**Exploding Massive Stars**  
**Exploding White Dwarfs**

**Big Bang**  
**Cosmic Ray Fission**

Based on graphic created by Jennifer Johnson

# Element Origins

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra																	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U													

**Merging Neutron Stars**  
**Dying Low Mass Stars**

**Exploding Massive Stars**  
**Exploding White Dwarfs**

**Big Bang**  
**Cosmic Ray Fission**

Based on graphic created by Jennifer Johnson

Coalescences observées à ce jour , le « chirp »

Waveforms and Chirp; CREDIT\_ LIGO\_ University of Oregon\_ Ben Farr

Film : 3-Waveforms and Chirp.mp4

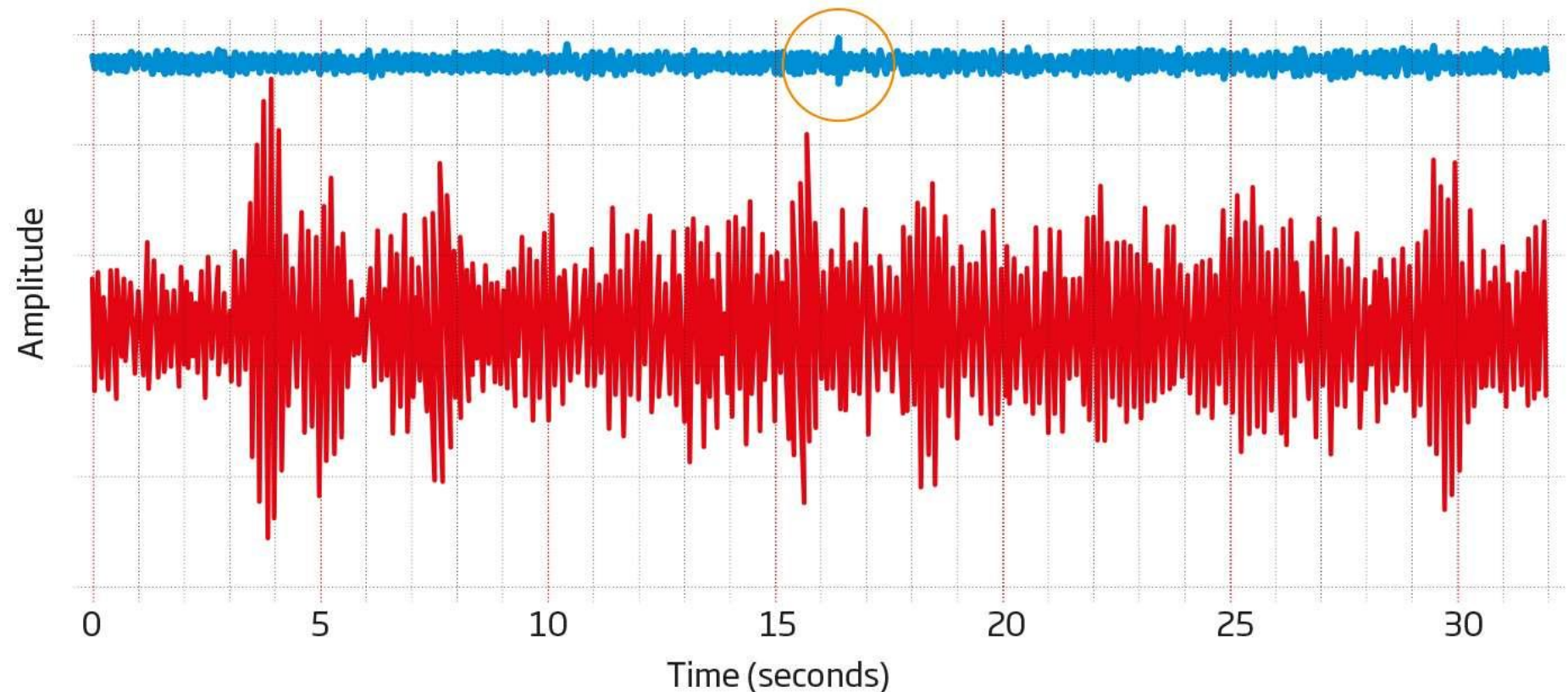
N'oubliez pas de monter le son



# Extraire le signal

## Cutting through the noise

The gravitational wave observed in September 2015 is obscured by noise in the **raw signal** from LIGO's Livingston detector. It is **only visible** in the **cleaned-up plot**, where irrelevant frequencies have been removed and the scale is magnified 100 times



## Approche du traitement du signal : méthode des « modèles » (template)(\*)

On a un signal  $s(t)$  qui est la superposition d'un bruit  $n(t)$  et d'un signal  $h(t)$

$$s(t) = h(t) + n(t)$$

$\langle n(t) \rangle = 0$  valeur moyenne d'un très grand échantillon de mesures du bruit à la date  $t$

On le remplace par la valeur moyenne d'un long enregistrement de  $n(t)$

$$\frac{1}{T} \int_0^T n(t) dt \rightarrow 0 \quad \text{quand } T \rightarrow \infty$$

Supposons que l'on connaisse a priori la forme et l'amplitude de  $h(t)$

On calcule numériquement :

$$\frac{1}{T} \int_0^T s(t)h(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T h(t)^2 dt + \frac{1}{T} \int_0^T n(t)h(t)dt$$

$$\text{Quand } T \rightarrow \infty : \frac{1}{T} \int_0^T h(t)^2 dt \rightarrow \approx h_0^2 \quad \text{et} \quad \frac{1}{T} \int_0^T n(t)h(t)dt \rightarrow 0$$

Une information a priori sur la forme de  $h(t)$  peut faciliter l'extraction du signal

(\*): aussi « filtrage adapté »

## Comment connaître $h(t)$ à l'avance

0° Transformée de Fourier (FFT) => Spectre de fréquence du signal

-Rapide (FFT)

-Problématique : le spectre du signal évolue pendant le phénomène, ne marche que sur des petits bouts d'enregistrement.

1° Résoudre l'équation d'Einstein complète, avec hypothèse sur l'origine physique :

- Analytiquement ...oubliez.

-Numériquement (temps de calcul !!!) en décomposant le phénomène par blocs.

2° Analytiquement sur des solutions approchées , avec hypothèse sur l'origine physique :

-Plus général

-Moins exact

-Permet de calculer vite et de faire varier les paramètres => Grilles de solutions.

3° Décomposition en ondelettes, sans faire d'hypothèse sur la nature physique du phénomène.

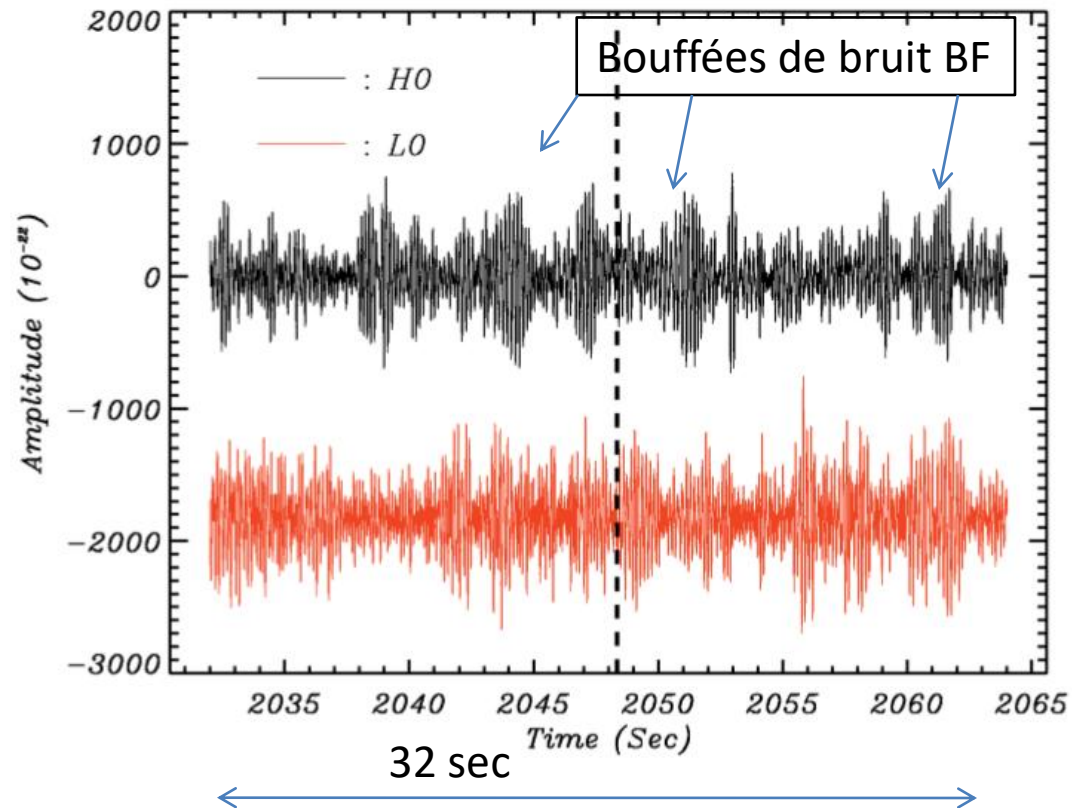


Règle d'or : savoir s'arrêter avant de commencer à inventer de l'info.



Utiliser les 3 méthodes, la 3eme a le plus de chance de découvrir **l'inconnu inconnu.**

Extraction du signal ...Quand on a un « bon » signal ; cas de GW150914  
32 secondes d'enregistrement : signal brut

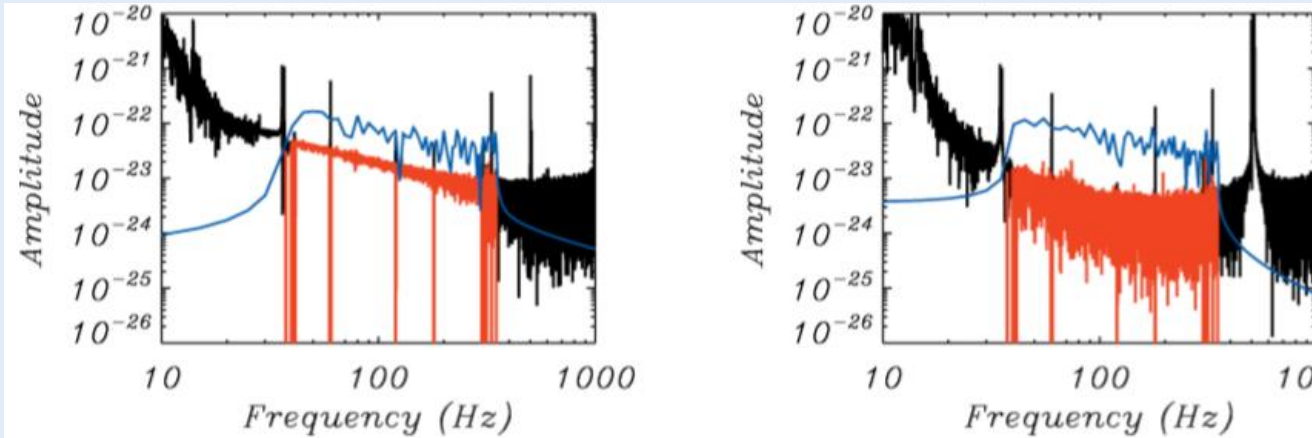


Hanford

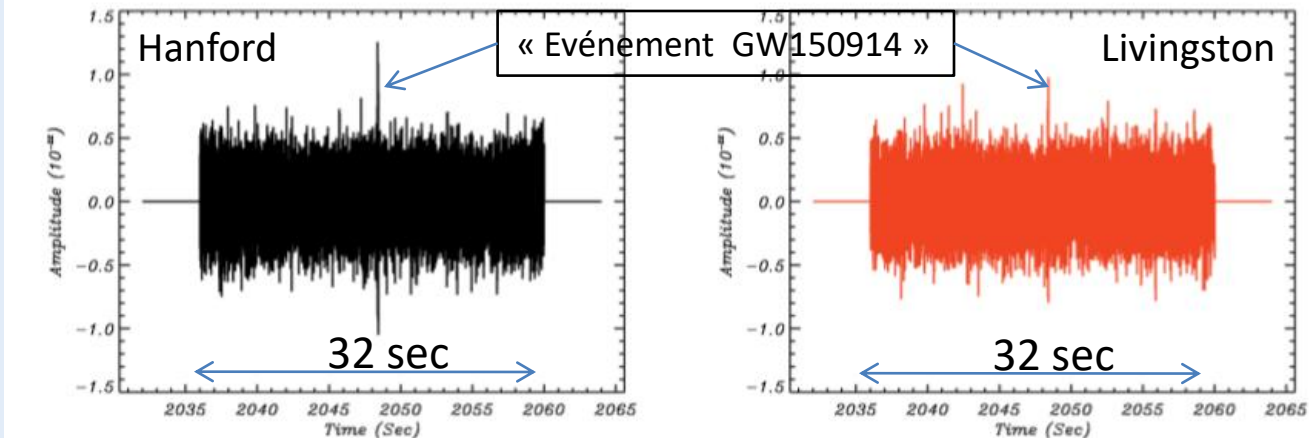
Livingston

**Figure 1.** The H32 and L32 records before cleaning . The black line corresponds to the Hanford 32s record, and the red line is for the Livingston 32s record before clipping. The vertical dashed line indicates the position of GW150914 event.

Transformée de Fourier de 32 sec d'enregistrement => spectre de fréquences (noir)  
 Nettoyage : on coupe les bords et les pics (rouge) => spectre corrigé



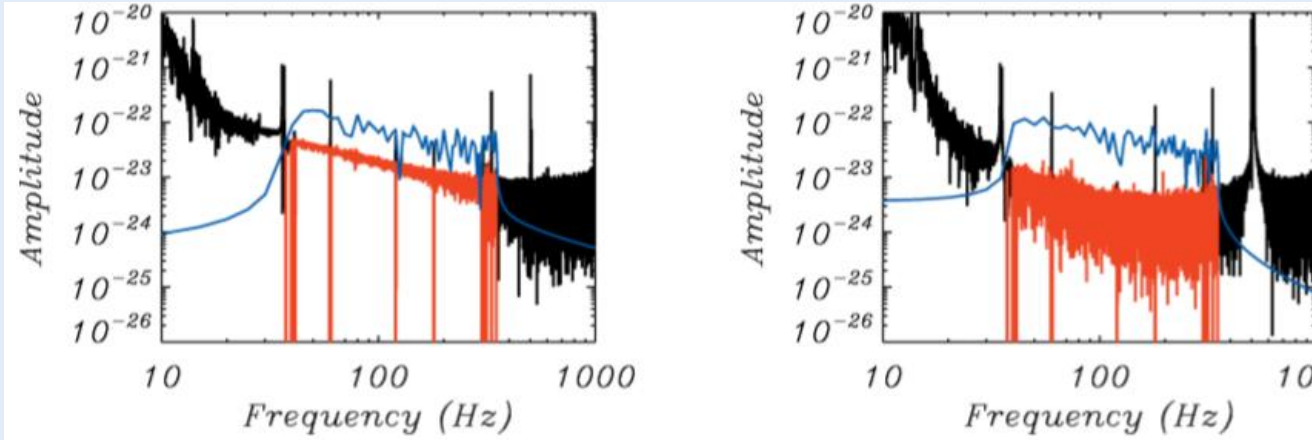
Transformée de Fourier inverse sur le spectre corrigé => données nettoyées



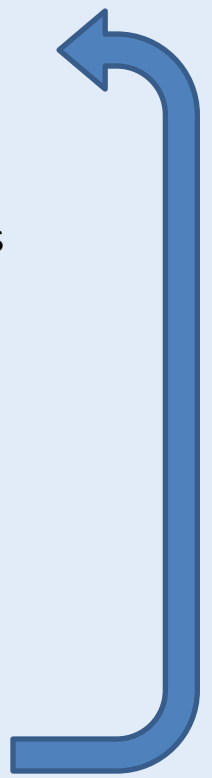
**Figure 2.** The top left panel shows the power spectrum of H32 before (black line) and after (red line) clipping. The top right panel shows the same for L32. The blue line corresponds to the power spectrum for the 0.2s GW150914 event after clipping. (The enhancement of the amplitude for this record by a factor of  $\sqrt{T_{32s}/T_{0.2s}}$  is due to the different lengths of the H32, L32 and GW150914 records.) The bottom panels show the time records for H32 (left) and L32 (right) after clipping but without displacement and inversion.

Transformée de Fourier de 32 sec d'enregistrement => spectre de fréquences (noir)

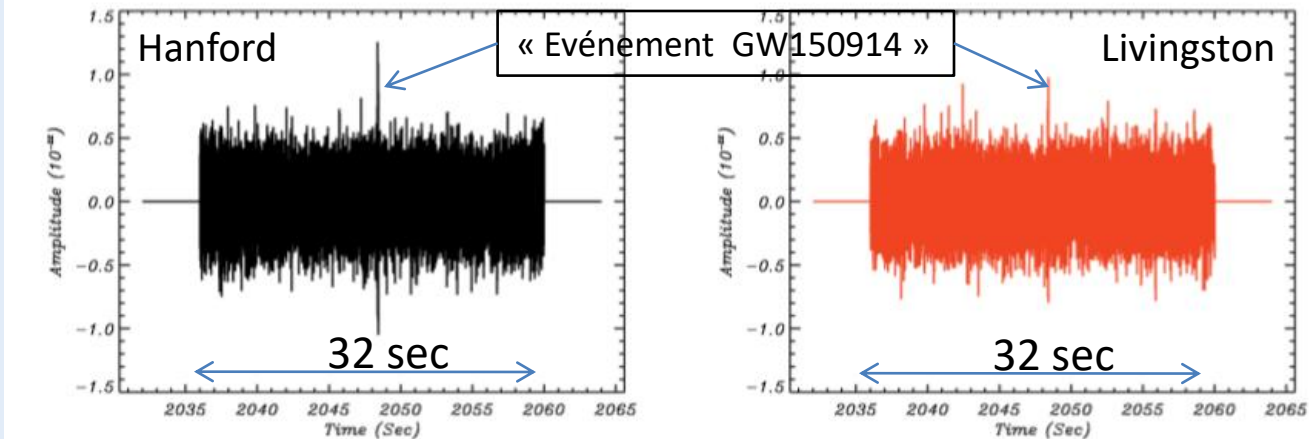
Nettoyage : on coupe les bords et les pics (rouge) => spectre corrigé



Similitude des spectre en trait bleu



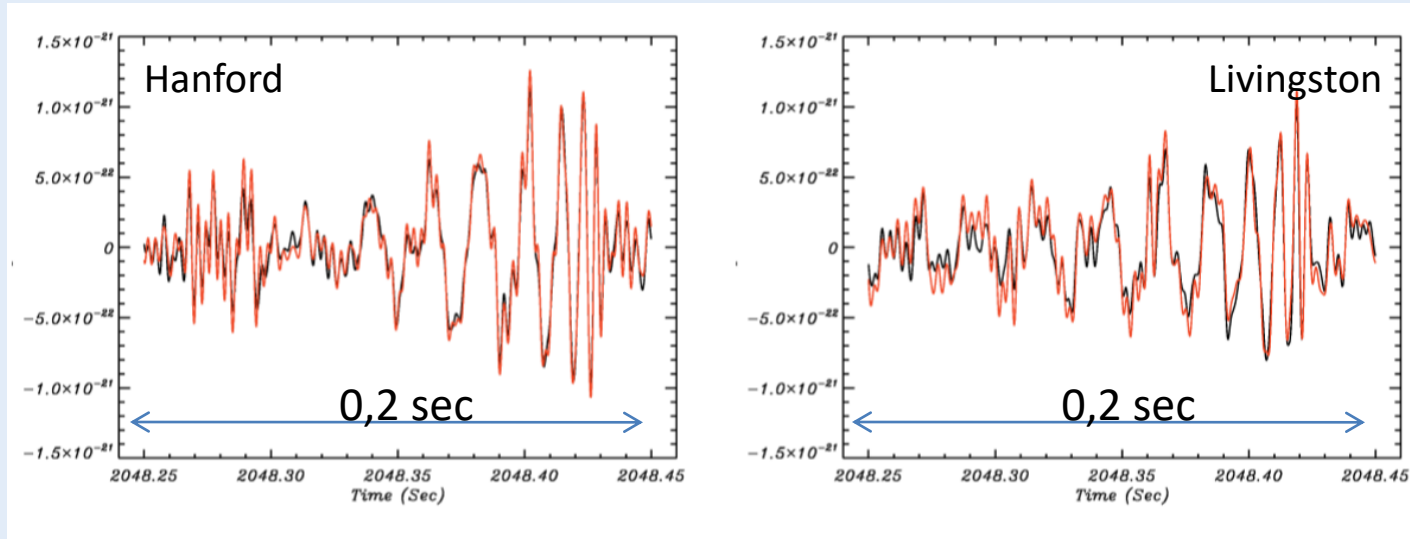
Transformée de Fourier inverse sur le spectre corrigé => données nettoyées



TF sur le morceau de 0,2 sec d'enregistrement nettoyé centré sur l'événement

**Figure 2.** The top left panel shows the power spectrum of H32 before (black line) and after (red line) clipping. The top right panel shows the same for L32. The blue line corresponds to the power spectrum for the 0.2s GW150914 event after clipping. (The enhancement of the amplitude for this record by a factor of  $\sqrt{T_{32s}/T_{0.2s}}$  is due to the different lengths of the H32, L32 and GW150914 records.) The bottom panels show the time records for H32 (left) and L32 (right) after clipping but without displacement and inversion.

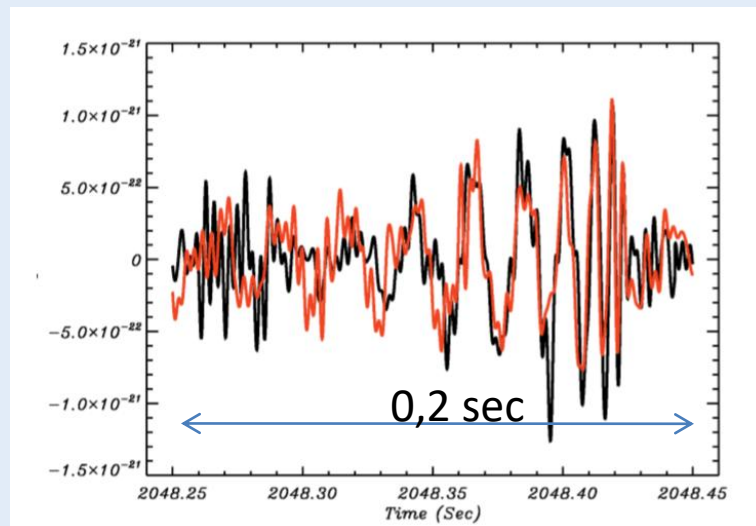
2 signaux identiques (ou presque !) mais décalé dans le temps ont la même TF

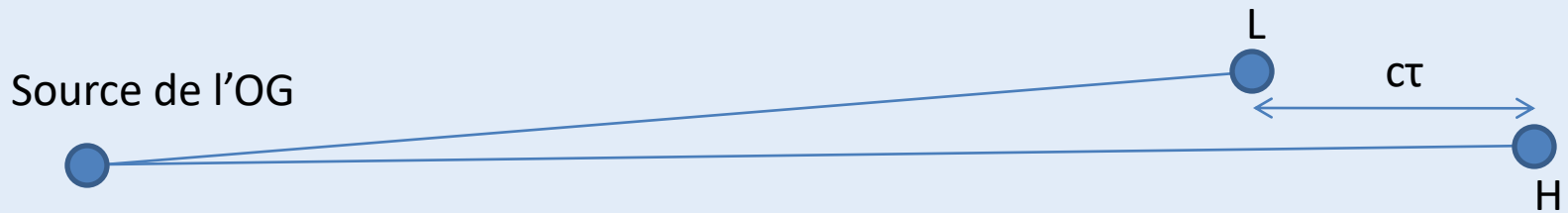


Alors on les superpose (Hanford /Livingston) : ils ont l'air identiques (ou presque) ! Victoire !

Superposés avec un décalage  
Dans le temps de  $\tau = 6,9$  msec.

Mais d'où sort ce décalage ?





Distance L-H = 3000 km  $\Rightarrow \tau_{\max} = 10 \text{ msec} = 3000(\text{km}) / 300000 (\text{km/sec})$

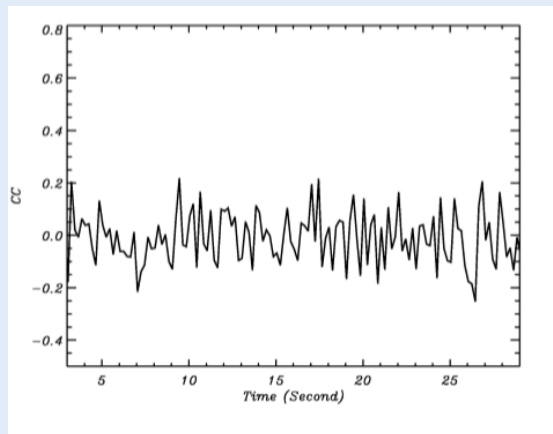
Pour un décalage  $\tau \leq 10 \text{ msec}$ , on calcule la corrélation croisée entre  $S_H(t)$  et  $S_L(t + \tau)$

$$C(\tau) = \frac{1}{N} \sum_j \bar{s}_H(t_j) \bar{s}_L(t_j, \tau),$$

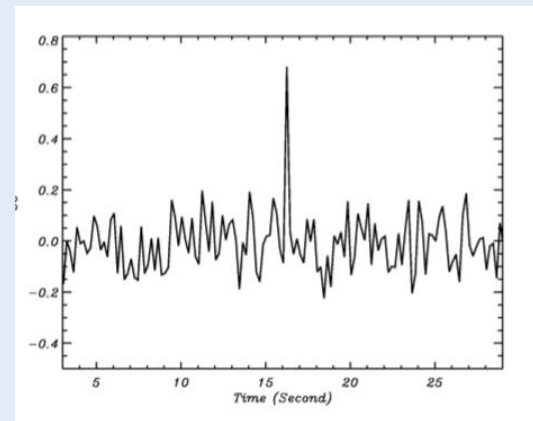
$$N = \left( \sum_i \bar{s}_H^2(t_i) \sum_k \bar{s}_L^2(t_k, \tau) \right)^{1/2},$$

$$\bar{s}_{H,L} = \bar{S}_{H,L} - \langle \bar{S}_{H,L} \rangle.$$

Pour  $\tau$  quelconque ( $< 10 \text{ msec}$ )

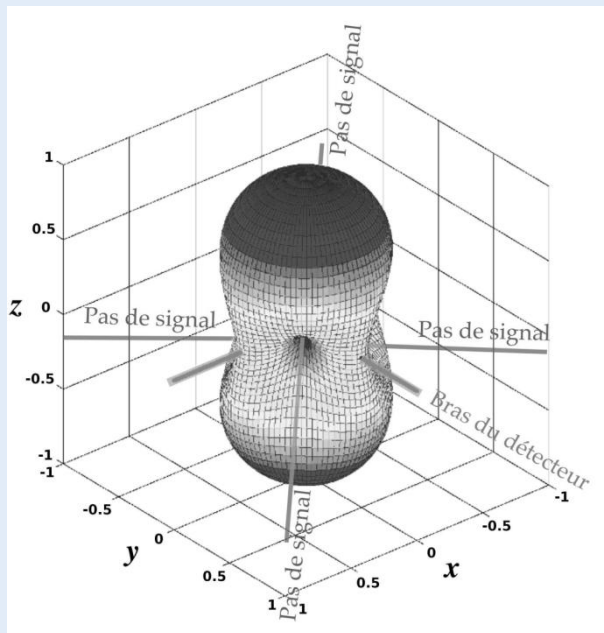


Pour  $\tau = 6,9 \text{ msec}$  BINGO !



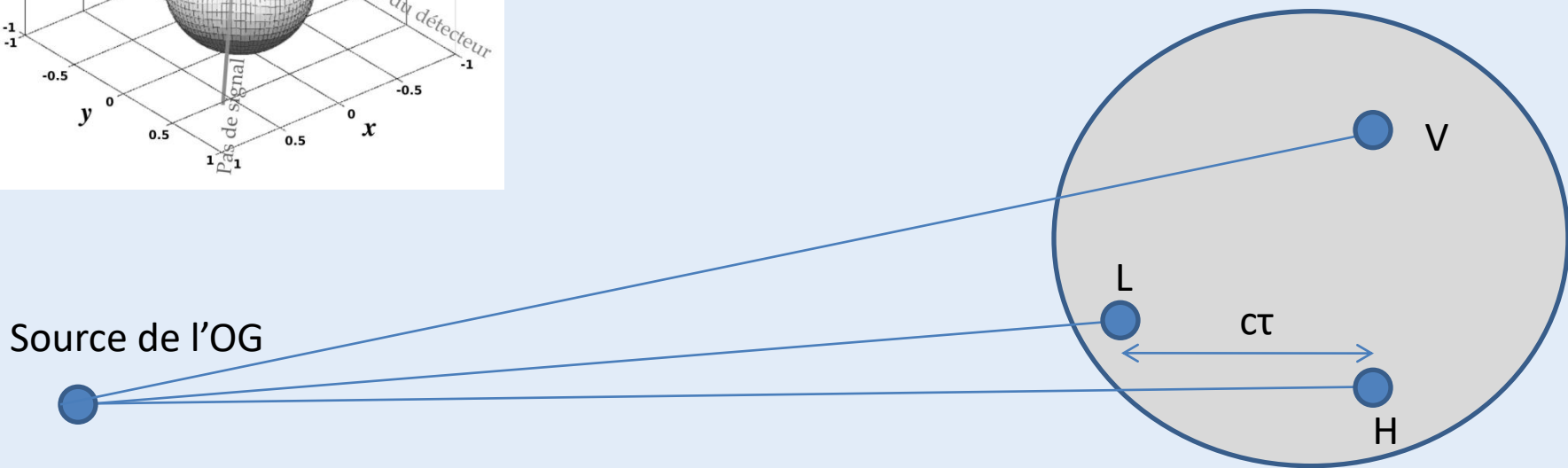


## Réponse d'un Michelson en fonction de la direction de la source



Nécessité de plusieurs observatoires pour localiser les sources

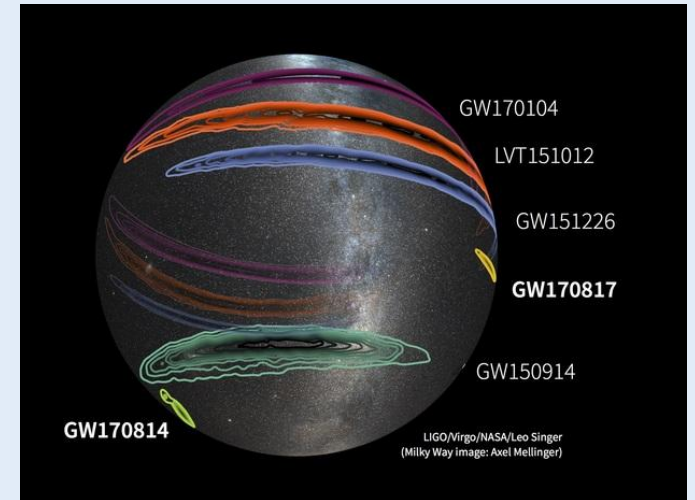
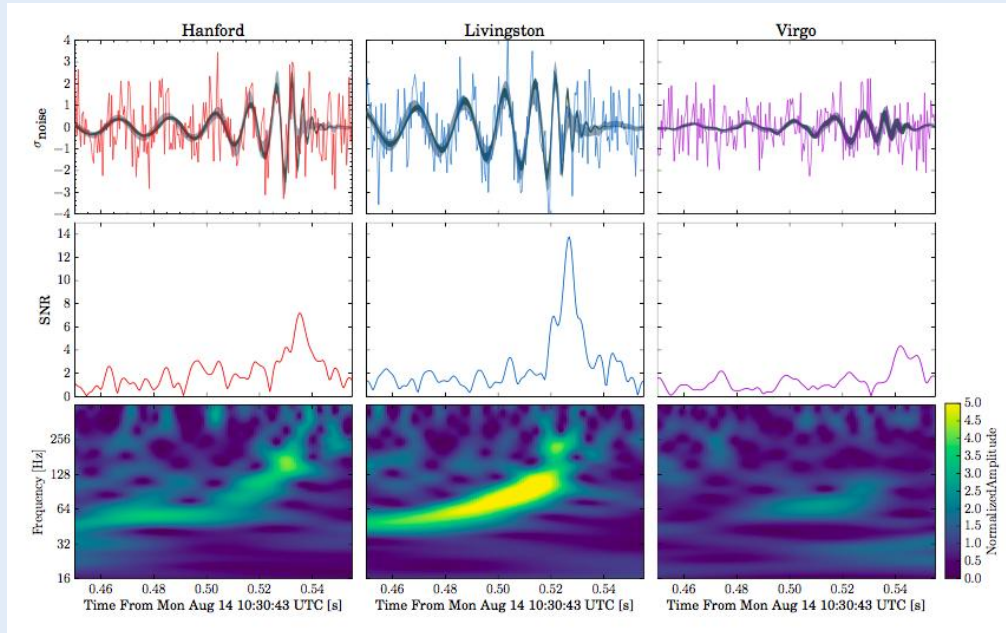
Avec 3 observatoires (LIGOH+LIGOL+VIRGO) on peut faire une triangulation



D'où la localisation relativement précise de GW170817 détectée par LIGO+VIRGO

# GW170817 Entrée dans une nouvelle ère de l'Astrophysique

Événement détecté par 3 interféromètres 2LIGO+1VIRGO



C'est la deuxième sorte de source d'OG prévue :

Coalescence de deux étoiles à neutron

→ Localisation plus précise

Et dans l'espace ?

# La suite : Détection des OG dans l'espace

LISA = Laser Interferometer Space Antena

Agence spatiale européenne + NASA abandonné

LISA - Pathfinder : Test technologique 2015

Maintenir une masse-test en situation de chute libre

Succès complet

eLISA - Agence spatiale européenne seule

Proposal : [https://www.elisascience.org/files/publications/LISA\\_L3\\_20170120.pdf](https://www.elisascience.org/files/publications/LISA_L3_20170120.pdf)

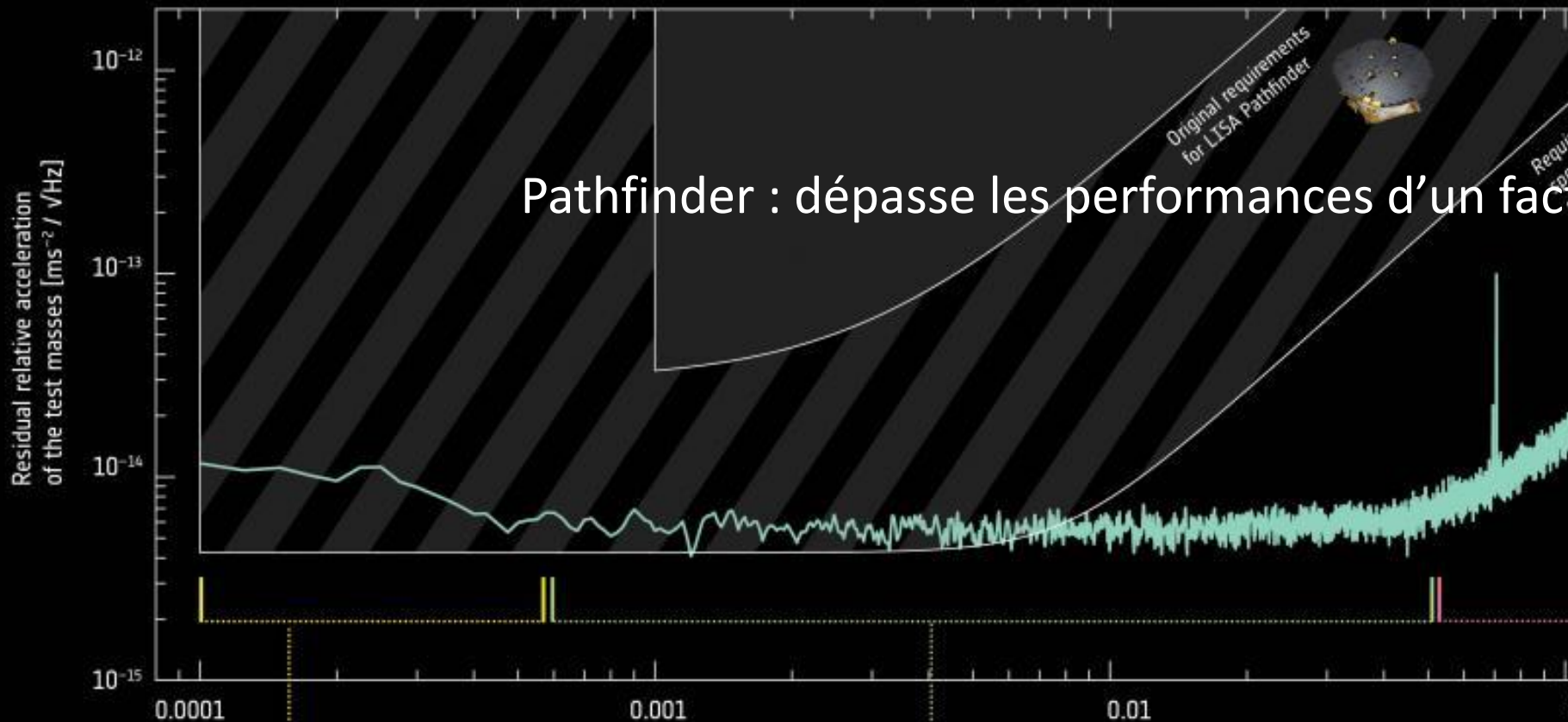
Mission : 203?

# Expérience pilote de l'ESA : Pathfinder?

En situation orbitale, est-on capable de maintenir, en une masse-test  
en état de « chute libre » ?

Autrement dit , dans un satellite en orbite :

Jusqu'à quelle limite peut on faire disparaître les perturbations  
gravitationnelles sur un miroir ?

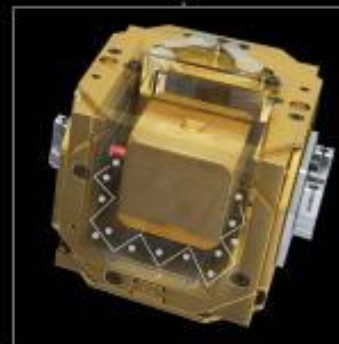


Pathfinder : dépasse les performances d'un facteur



### Centrifugal force

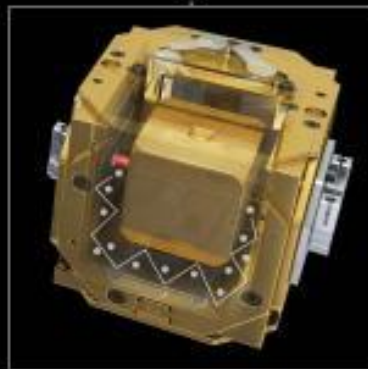
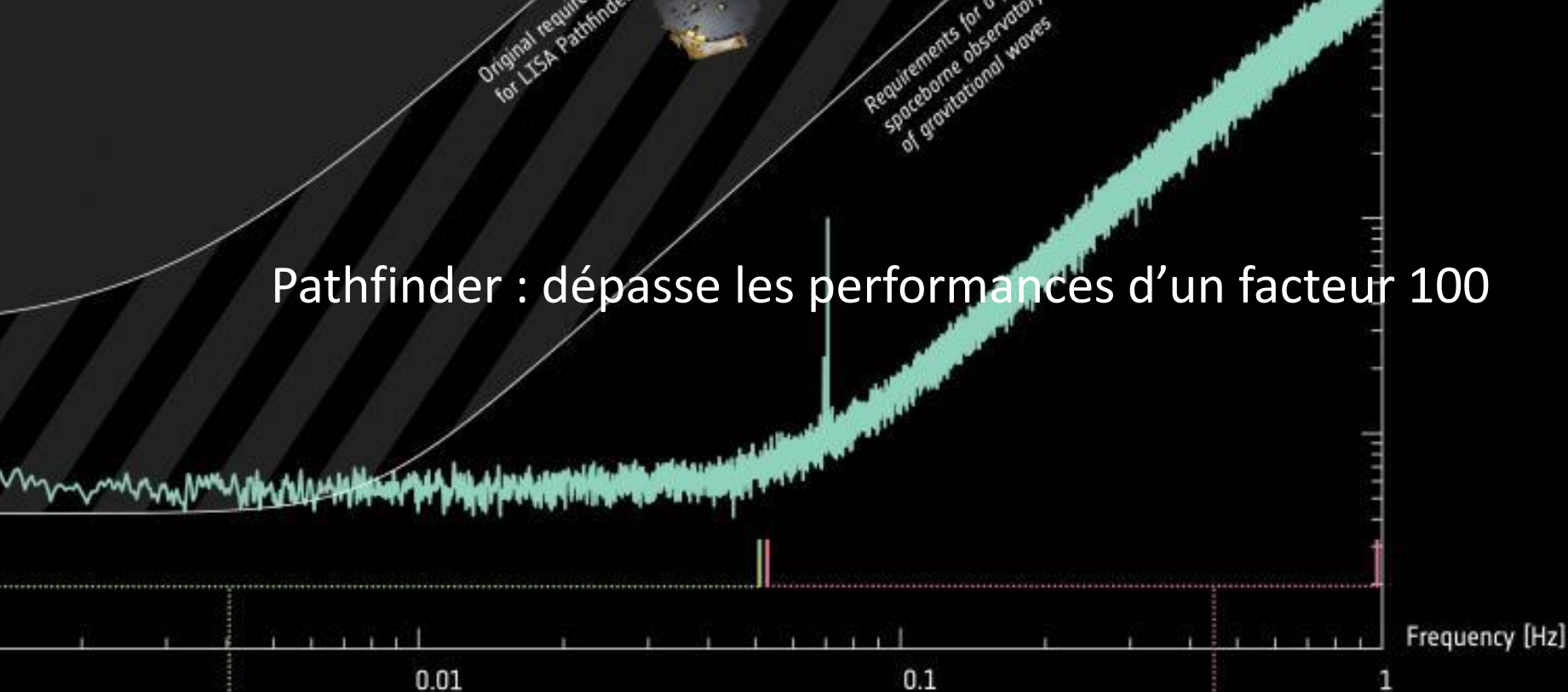
The rotation of the spacecraft required to keep the solar array pointed at the Sun and the antenna pointed towards Earth, coupled with the noise of the startrackers produces a noisy centrifugal force on the test masses. This noise term has been subtracted, and the source of the residual noise after subtraction is still being investigated.



### Gas damping

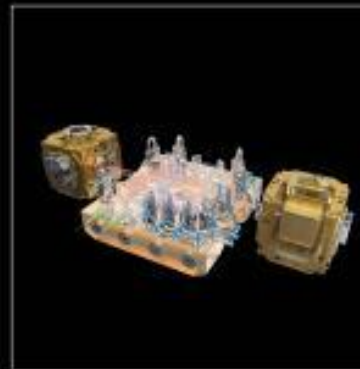
Inside their housings, the test masses collide with some of the few gas molecules still present. This noise term becomes smaller with time, as more gas molecules are vented to space.

# Pathfinder : dépasse les performances d'un facteur 100



## Gas damping

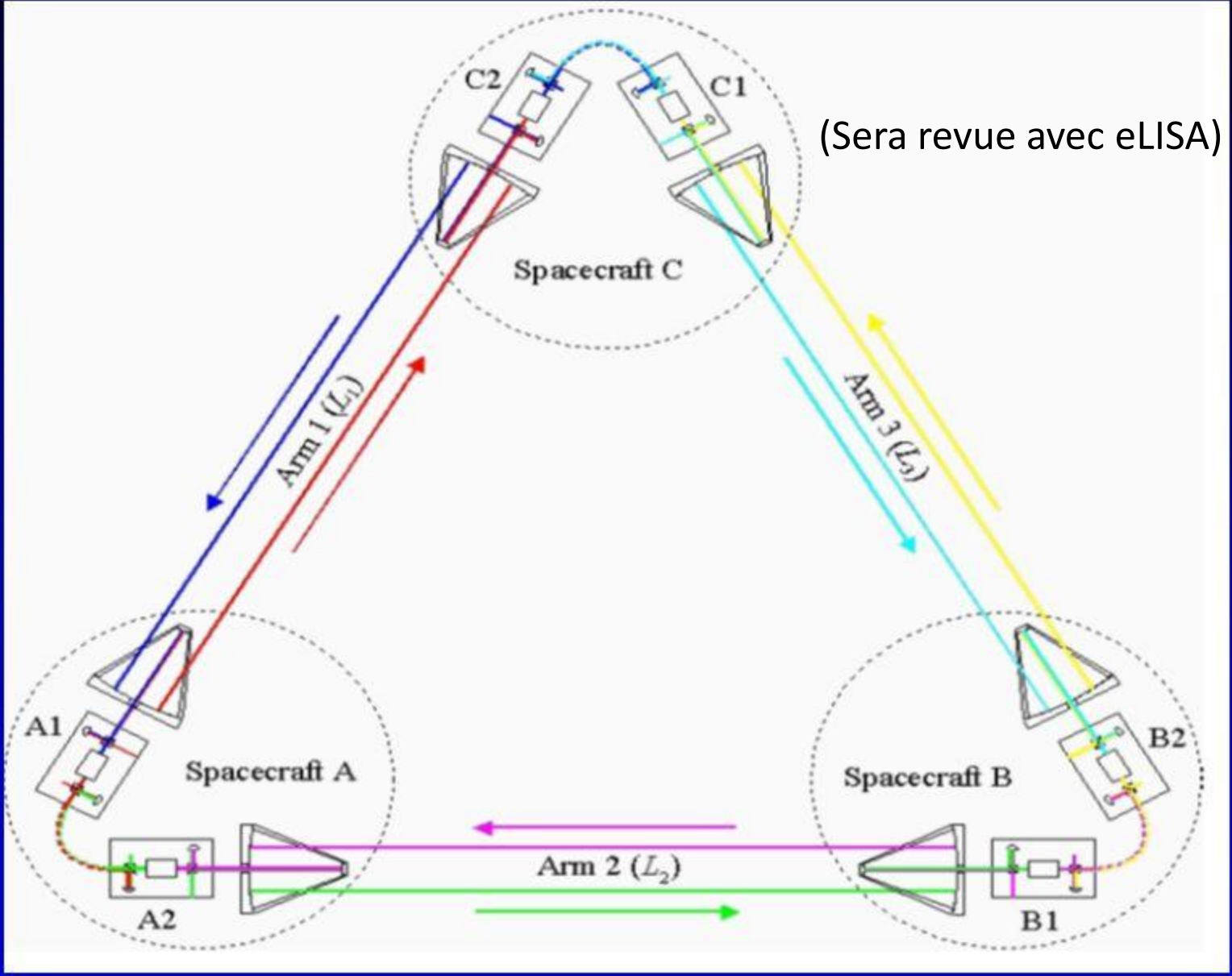
Inside their housings, the test masses collide with some of the few gas molecules still present. This noise term becomes smaller with time, as more gas molecules are vented to space.



## Sensing noise

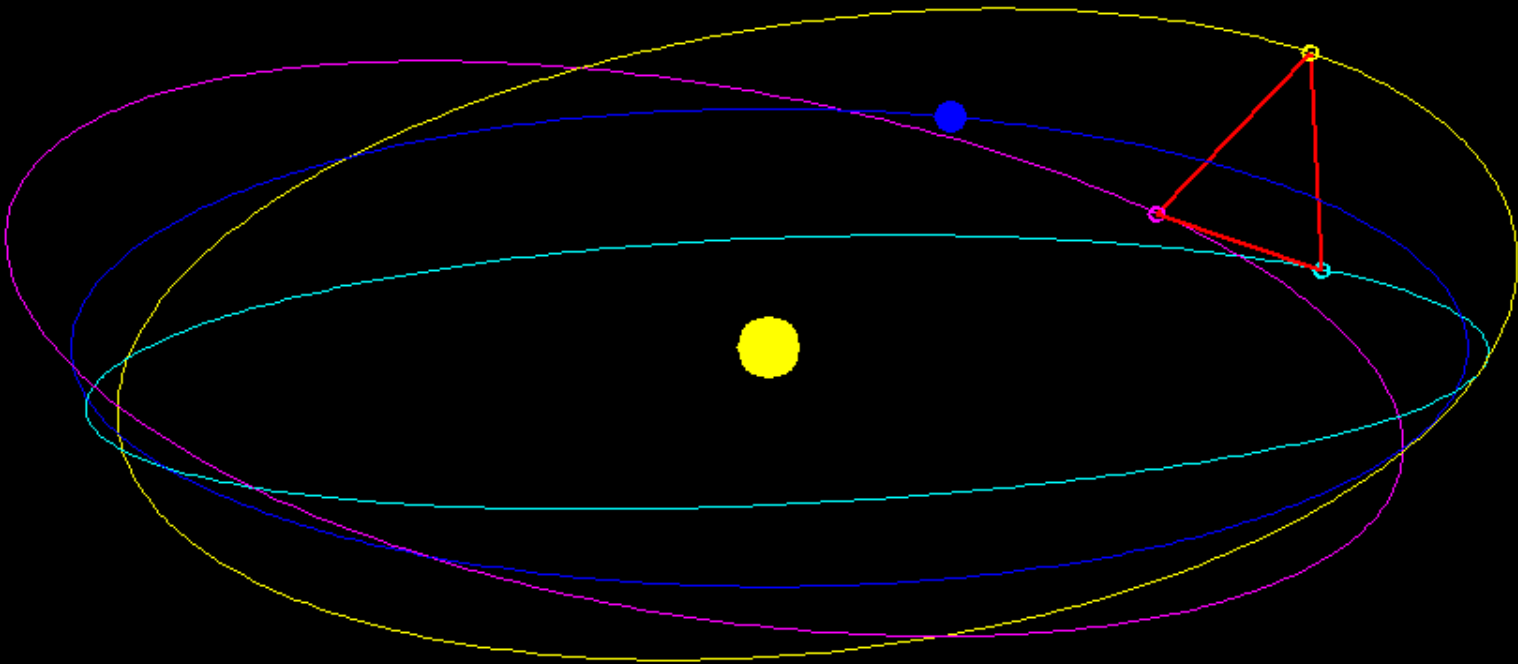
The sensing noise of the optical metrology system used to monitor the position and orientation of the test masses, at a level of  $35 \text{ fm} / \sqrt{\text{Hz}}$ , has already surpassed the level of precision required by a future gravitational-wave observatory by a factor of more than 100.

# La configuration optique



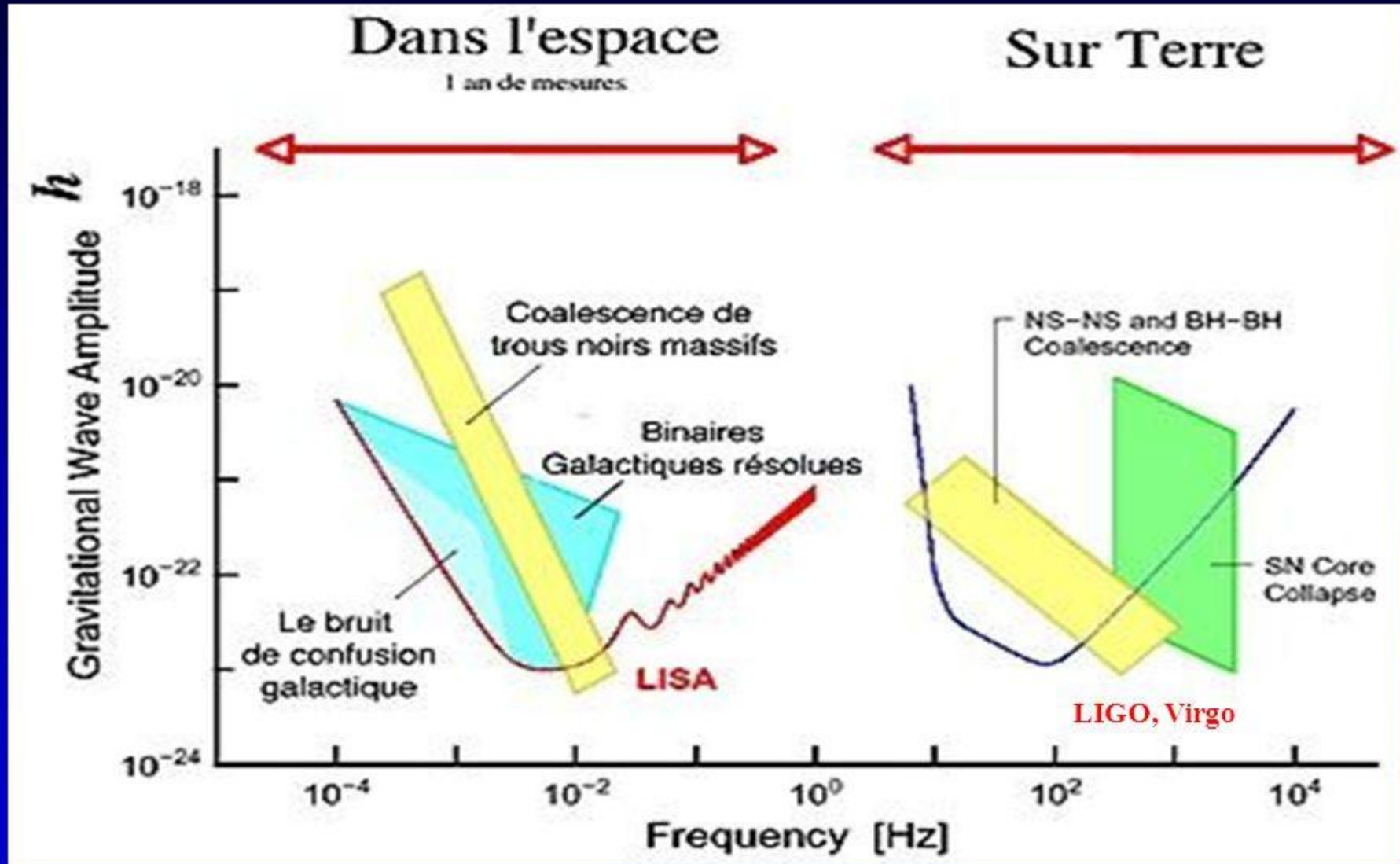
(Sera revue avec eLISA)





Nicolas Douillet - ARTEMIS

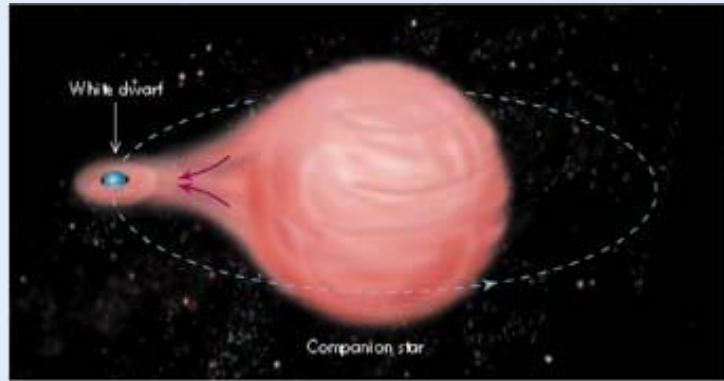
# Les sources d'Ondes Gravitationnelles



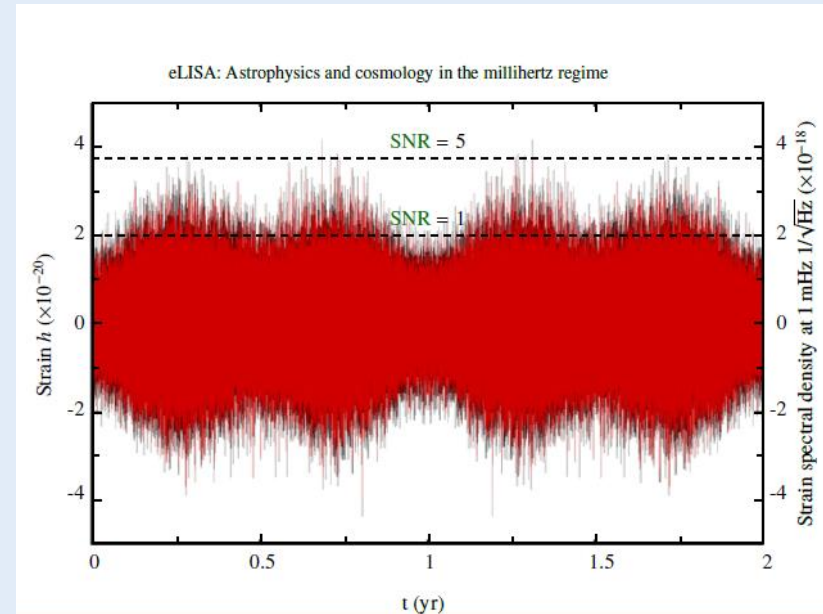
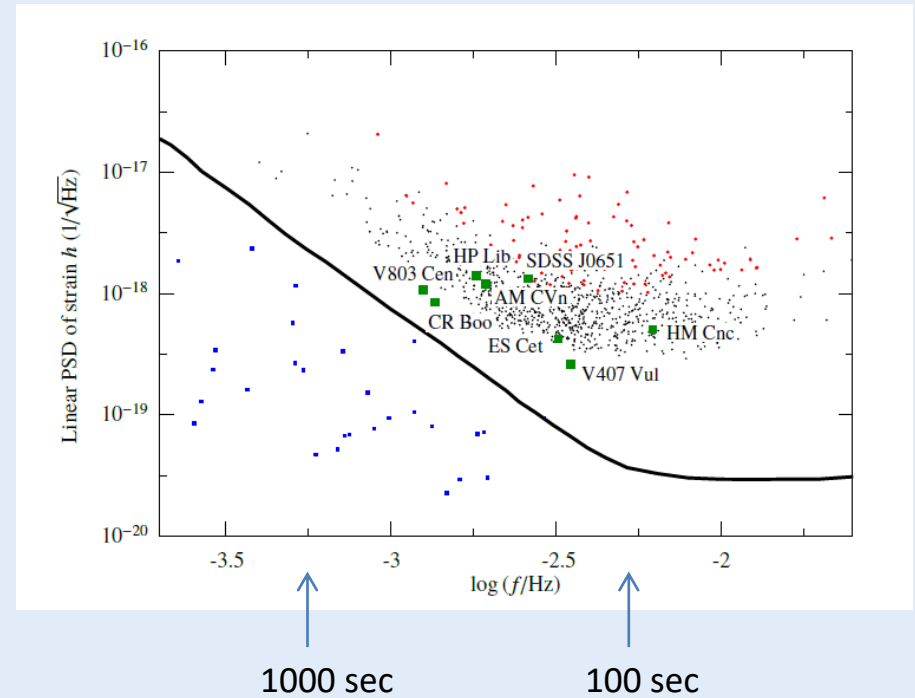
# Astrophysique avec eLISA

## Systèmes Binaires compactes

- majorité des étoiles = systèmes binaires
- si serrées (50%) interaction d'évolution entre les 2 étoiles



- Progéniteurs des supernova
- étoiles à neutron binaires
- Diminution de la séparation  $\rightarrow$  OG
- Fond des binaires galactiques à  $1/f > 1000$  sec seulement quelques unes individualisées



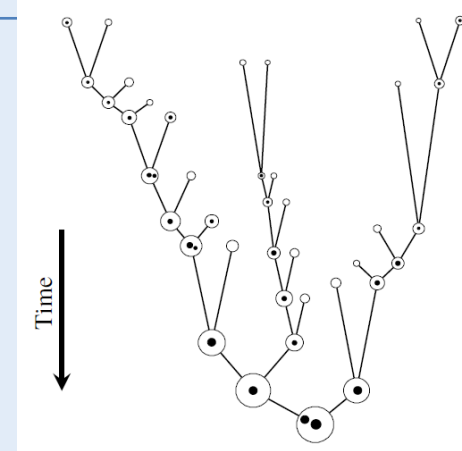
Etoile qui 'tombe' dans un TN

<https://www.futura-sciences.com/sciences/videos/rencontre-apocalyptique-etoile-trou-noir-3035/>

## Astrophysique avec eLISA

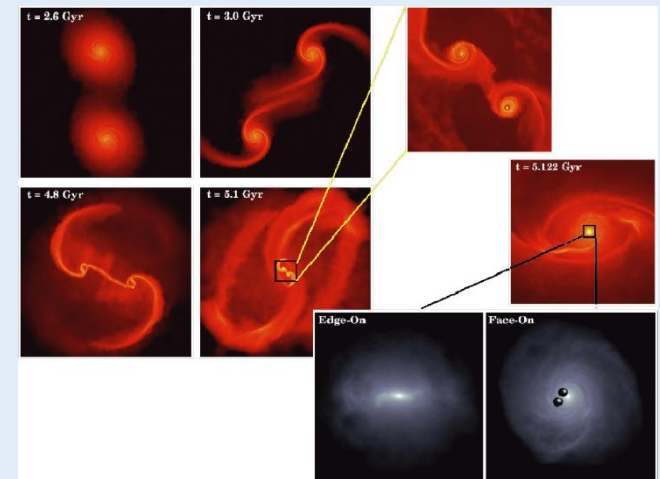
### Trous noirs de toutes sortes

- Trous noirs stellaires 3 à  $100 M_{\odot}$
- Trous noirs super massif au centre des galaxies  $10^7$  à  $10^9 M_{\odot}$   
fabriqués par accrétion de matière + coalescence de petites galaxies  
(avec ou sans TN central) dans la gamme  $10^4$  à  $10^7 M_{\odot}$  .
- Etudier l'accrétion par le TN (gaz et étoiles)
- Ses effets sur la rotation du TN (accessible par les OG !)
- cas particulier « chute » d'une étoile dans un TN (grand rapport de masse)



Tester la RG en régime de « champs forts »  
dans des conditions dynamiques

Développer les modèles théoriques des OG  
produites pendant les 3 phases :  
approche – coalescence – amortissement  
in-spiral - merger - ring-down



**FIN**